



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,  
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

DISEÑO DE UNA RED ÓPTIMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
DOMICILIARIOS PARA MINIMIZAR IMPACTOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS  
DE LA COMUNA DE LA GRANJA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

JOSEFA IGNACIA ORELLANA SOLAR

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ÁLVARO OLIVERA NAPPA  
VALERIA PROBOSTE SOBARZO

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA  
POR: JOSEFA IGNACIA ORELLANA SOLAR  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

DISEÑO DE UNA RED ÓPTIMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
DOMICILIARIOS PARA MINIMIZAR IMPACTOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS  
DE LA COMUNA DE LA GRANJA

En la actualidad, Chile produce sobre 7 millones de toneladas de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) al año, correspondiendo a la Región Metropolitana (RM) cerca del 40 % de lo producido a nivel nacional. Con el fin de disminuir la disposición final de los RSD, es necesario aplicar la Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP), que promueve priorizar unos tratamientos de residuos sobre otros..

El presente trabajo busca proponer una metodología de trabajo para planificar la gestión de residuos y aplicarla en la comuna de La Granja, como una primera etapa para, más adelante, extender el método a toda la región y/o país.

El objetivo general de este trabajo es diseñar una red óptima de tratamiento de RSD para minimizar impactos negativos ambientales y económicos de la comuna.

Se decide trabajar con los residuos plásticos debido a su aporte volumétrico respecto a la generación de residuos totales. Además, a partir del funcionamiento actual de la comuna, se propone la instalación de nuevos puntos limpios y/o plantas de tratamiento de pirólisis y/o de combustión. De esta manera, se propone un modelo de optimización MILP multiobjetivo para decidir la instalación de los nuevos puntos de gestión y tratamiento de residuos, y los flujos máxicos de la red.

Finalmente, se obtiene que la mayoría de las soluciones proponen contar con plantas de tratamiento mecánico que sean capaces de tratar todo el flujo de residuo plástico que se genere en la comuna, pero para ello también debe existir un aumento del flujo tratado por el centro de acopio, junto con una mayor cobertura de retiro de plástico en La Granja. Por otro lado, la mayoría de las soluciones obtenidas no indican el uso de los puntos verdes, y ninguna propone la instalación ni uso de los puntos limpios, lo que puede tener sentido desde el punto de vista económico según los datos utilizados. Además, queda pendiente asignar importancias relativas a las funciones objetivo, pues dicha importancia no tiene que ser 50 % y 50 %, necesariamente.

Se concluye que es posible aplicar la metodología de optimización con el fin de proponer una red óptima de tratamiento del residuo plástico, sin embargo, los resultados podrían mejorar si se contara con datos completos y veraces del sistema, y si se incluyera una solución para las rutas de los camiones que participan en la comuna. Así, queda propuesto mejorar la metodología de trabajo y expandirla a otras comunas y regiones del país.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	2
1.1.1. Proceso Actual . . . . .	2
1.1.2. Tratamientos existentes en la comuna de La Granja . . . . .	3
1.1.3. Representación de red de tratamiento de residuos . . . . .	6
1.1.4. Estado del arte . . . . .	8
1.1.5. Formulación del problema de optimización . . . . .	11
1.2. Importancia del trabajo propuesto en el contexto . . . . .	14
1.3. Objetivos . . . . .	14
1.3.1. Objetivo general . . . . .	14
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	14
1.4. Alcances . . . . .	15
<b>2. Situación actual de la comuna y su representación gráfica</b>	<b>16</b>
2.1. Metodología . . . . .	16
2.2. Resultados . . . . .	17
2.2.1. Caracterización de residuos sólidos domiciliarios comuna de La Granja	17
2.2.2. Puntos de distribución en la comuna . . . . .	19
2.3. Discusiones . . . . .	22
<b>3. Selección del residuo a estudiar</b>	<b>23</b>
3.1. Metodología . . . . .	23
3.2. Resultados . . . . .	24
3.3. Discusiones . . . . .	26
<b>4. Tratamientos disponibles para el reciclaje de plástico</b>	<b>27</b>
4.1. Metodología . . . . .	27
4.2. Resultados . . . . .	28
4.2.1. Reciclaje mecánico . . . . .	28
4.2.2. Reciclaje químico . . . . .	29
4.3. Discusiones . . . . .	32
<b>5. Modelo gráfico de la situación actual</b>	<b>33</b>
5.1. Metodología . . . . .	33
5.1.1. División de la comuna por franjas . . . . .	33
5.1.2. Esquema modelo actual . . . . .	34
5.2. Resultados . . . . .	34

5.2.1.	División de la comuna por franjas . . . . .	34
5.2.2.	Esquema modelo actual . . . . .	36
5.3.	Discusiones . . . . .	37
<b>6.</b>	<b>Modelo gráfico de otras opciones de gestión de tratamiento</b>	<b>38</b>
6.1.	Metodología . . . . .	38
6.1.1.	Selección ubicación de nuevos puntos limpios . . . . .	38
6.1.2.	Modelo gráfico de Superestructura . . . . .	39
6.2.	Resultados . . . . .	39
6.2.1.	Selección ubicación de nuevos puntos limpios . . . . .	39
6.2.2.	Representación gráfica de la Superestructura . . . . .	40
6.3.	Discusiones . . . . .	42
<b>7.</b>	<b>Formulación del problema de optimización</b>	<b>43</b>
7.1.	Metodología . . . . .	43
7.2.	Resultados . . . . .	44
7.2.1.	Funciones objetivo . . . . .	44
7.2.2.	Conjuntos . . . . .	45
7.2.3.	Parámetros: Costos de operación . . . . .	46
7.2.4.	Parámetros: Costos de inversión . . . . .	47
7.2.5.	Parámetros: Costos de Transporte . . . . .	48
7.2.6.	Parámetros: Valores del indicador ambiental para diferentes tratamientos	49
7.2.7.	Parámetros: Flujos iniciales . . . . .	49
7.2.8.	Parámetros: Distancias . . . . .	50
7.2.9.	Variables . . . . .	54
7.2.10.	Restricciones matemáticas . . . . .	55
7.2.11.	Funciones objetivo . . . . .	59
7.3.	Discusiones . . . . .	61
7.3.1.	Costos de operación . . . . .	61
7.3.2.	Costos de inversión . . . . .	62
7.3.3.	Costos de Transporte . . . . .	63
7.3.4.	Puntajes asignados a los distintos tratamientos . . . . .	63
7.3.5.	Condiciones iniciales . . . . .	64
7.3.6.	Distancias . . . . .	64
<b>8.</b>	<b>Solución problema de optimización</b>	<b>65</b>
8.1.	Metodología . . . . .	65
8.2.	Optimización multiobjetivo . . . . .	66
8.2.1.	Problema 1. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 1 . . . . .	66
8.2.2.	Problema 2. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 2 . . . . .	68
8.2.3.	Problema 3. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 1 . . . . .	70
8.2.4.	Problema 4. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 2 . . . . .	71
8.3.	Óptimo . . . . .	73
8.3.1.	Problema 1. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 1 . . . . .	73
8.3.2.	Problema 2. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 2 . . . . .	75
8.3.3.	Problema 3. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 1 . . . . .	76
8.3.4.	Problema 4. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 2 . . . . .	78

8.4. Discusiones generales . . . . .	79
<b>9. Observaciones generales</b>	<b>81</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>82</b>
<b>Glosario</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>
<b>Anexos</b>	<b>94</b>
<b>A. Situación actual de la comuna y su representación gráfica</b>	<b>95</b>
A.1. Residuos sólidos domiciliarios en La Granja . . . . .	95
<b>B. Modelo gráfico de la situación actual</b>	<b>96</b>
B.1. Esquema modelo actual . . . . .	96
B.2. Balance de Masa . . . . .	98
B.2.1. Metodología . . . . .	98
B.2.2. Matriz 1 . . . . .	98
B.2.3. Matriz 2 . . . . .	100
B.2.4. Matriz 3 . . . . .	101
B.2.5. Matriz 4 . . . . .	102
B.2.6. Matriz 5 . . . . .	104
B.2.7. Discusiones respecto al balance de masa . . . . .	105
<b>C. Formulación del problema de optimización</b>	<b>107</b>
C.1. Costos de operación . . . . .	107
C.1.1. Costos operacionales del Centro de Acopio . . . . .	107
C.1.2. Costos operacionales de plantas de tratamiento . . . . .	109
C.2. Costos de inversión y capacidad de instalaciones . . . . .	110
C.2.1. Recopilación de parámetros . . . . .	110
C.2.2. Ajuste de parámetros según capacidades propuestas . . . . .	112
C.3. Costos de Transporte . . . . .	113
C.3.1. Costos de transporte camión recolector . . . . .	113
C.3.2. Costos de transporte camión de reciclaje . . . . .	114
C.3.3. Costos de transporte vehículos particulares . . . . .	114
C.4. Puntajes asignados a los distintos tratamientos . . . . .	116
C.4.1. Escenario 1 . . . . .	116
C.4.2. Escenario 2 . . . . .	116
C.5. Código . . . . .	118
<b>D. Solución problema de optimización</b>	<b>127</b>
D.1. Optimización multiobjetivo . . . . .	127
D.1.1. Problema 1 . . . . .	128
D.1.2. Problema 2 . . . . .	129
D.1.3. Problema 3 . . . . .	129
D.1.4. Problema 4 . . . . .	130

D.2. Óptimos . . . . .	131
D.2.1. Problema 1 . . . . .	131
D.2.2. Problema 2 . . . . .	148
D.2.3. Problema 3 . . . . .	165
D.2.4. Problema 4 . . . . .	182

# Índice de Tablas

1.1. Algunos tipos de proyectos de valorización . . . . .	4
2.1. Caracterización residuos sólidos domiciliarios 2018, comuna de La Granja . .	19
2.2. Direcciones y materiales recibidos por cada punto verde. . . . .	20
2.3. Información específica de otros puntos de distribución de la comuna. . . . .	20
3.1. Caracterización de residuos sólidos domiciliarios de la comuna por semana, respecto al volumen. . . . .	25
3.2. Densidad aparente de los distintos tipos de envases plásticos.. . . . .	25
3.3. Algunos materiales destinados a envasado, y sus respectivos años de descomposición. . . . .	26
5.1. Descripción específica de cada una de las franjas de la comuna. . . . .	35
6.1. Direcciones de algunos microbasurales de la comuna de La Granja . . . . .	39
6.2. Descripción de los flujos del sistema. . . . .	41
7.1. Conjuntos y subconjuntos del problema de optimización y sus respectivos elementos. . . . .	46
7.2. Costos de disposición final y de operación del centro de acopio y plantas de tratamientos. . . . .	46
7.3. Parámetros genéricos para los costos de instalación. . . . .	47
7.4. Valores de las capacidades invariables de los puntos limpios, centro de acopio, estación de transferencia y relleno sanitario. . . . .	47
7.5. Costos de inversión considerando el caso 1 y 2 respecto a las capacidades de las plantas de tratamiento propuestas. . . . .	48
7.6. Capacidades de las plantas de tratamiento según los dos casos propuestos. . .	48
7.7. Parámetros utilizados para calcular el costo de transporte total. . . . .	48
7.8. Puntajes asignados para cada tipo de manejo del residuo plástico en los dos escenarios propuestos. . . . .	49
7.9. Flujo másico generado por cada franja. . . . .	50
7.10. Distancia punto limpio antiguo al centro de acopio . . . . .	50
7.11. Distancia puntos limpio nuevos al centro de acopio . . . . .	51
7.12. Distancia de franjas a estación de transferencia . . . . .	51
7.13. Distancias de franjas a centro de acopio . . . . .	52
7.14. Distancia entre puntos verdes y centro de acopio . . . . .	52
7.15. Distancia entre centro de acopio y estación de transferencia . . . . .	52

7.16. Distancia entre estación de transferencia y relleno sanitario . . . . .	53
7.17. Distancia entre franjas y puntos verdes. De PV1 a PV14. . . . .	53
7.18. Distancia entre franjas y puntos verdes. De PV15 a PV28. . . . .	53
7.19. Distancia entre franjas y punto limpio antiguo . . . . .	54
7.20. Distancia entre franjas y puntos limpios nuevos. . . . .	54
8.1. Valores reales punto ideal y anti ideal. . . . .	66
8.2. Valores reales punto ideal y anti ideal. . . . .	69
8.3. Valores reales punto ideal y anti ideal. . . . .	70
8.4. Valores reales punto ideal y anti ideal. . . . .	71
8.5. Problema 1: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes. . . . .	74
8.6. Problema 2: Resultados de las variables considerando un 90 % de importancia para la función de costos y un 10 % para la función de puntajes. . . . .	75
8.7. Problema 3: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes. . . . .	76
8.8. Problema 4: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes. . . . .	79
A.1. Residuos sólidos Domiciliarios producidos por año, expresados en kilogramo. . . . .	95
B.1. Matriz para determinar el balance de masa entre las Franjas y PV, PL1, CA0 y ET0. . . . .	100
B.2. Matriz para determinar el balance de masa entre los elementos de PV y el CA. . . . .	101
B.3. Matriz para determinar el balance de masa entre PL1 y CA. . . . .	102
B.4. Toneladas recuperadas por tipo de residuo durante el año 2018. . . . .	103
B.5. Matriz para determinar el balance de masa entre CA hacia sus destinos ET y PT01. . . . .	104
B.6. Matriz para determinar el balance de masa entre ET y RS. . . . .	105
C.1. Tabla de gastos operacionales mensuales en el Centro de Acopio (incompleta) . . . . .	107
C.2. Datos energía utilizada por cinta transportadora. . . . .	108
C.3. Tabla de gastos operacionales mensuales en el Centro de Acopio (completa) . . . . .	109
C.4. Costos de operación plantas de tratamientos. . . . .	109
C.5. Datos para calcular K1 y K3, para la planta de tratamiento de mecánico y para la planta de combustión. . . . .	110
C.6. Datos para calcular K2, para la planta de tratamiento de pirólisis. . . . .	110
C.7. Valores de parámetros utilizados para calcular el costo de inversión de las instalaciones propuestas. . . . .	111
C.8. Valores de las capacidades de las instalaciones existentes y propuestas del sistema. . . . .	111
C.9. Costos de inversión considerando 300 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento propuestas. . . . .	112
C.10. Costos de inversión considerando 100 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento propuestas. . . . .	112
C.11. Valores de datos para el cálculo del rendimiento del camión recolector. . . . .	114
C.12. Valores de datos para el cálculo del rendimiento del camión de reciclaje. . . . .	114
C.13. Rendimientos de los 10 vehículos más vendidos en Chile en el año 2018 . . . . .	115



D.1. Valores reales punto ideal y anti ideal. . . . .	128
D.2. Problema 1: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas. . . . .	129
D.3. Problema 2: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas. . . . .	129
D.4. Problema 3: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas. . . . .	130
D.5. Problema 4: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas. . . . .	130
D.6. Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 1, en toneladas por mes. . . . .	146
D.7. Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 1, en toneladas por mes. . . . .	147
D.8. Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 1. . . . .	147
D.9. Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 1. . . . .	147
D.10.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 1. . . . .	147
D.11.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 1. . . . .	148
D.12.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 2, en toneladas por mes. . . . .	163
D.13.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 2, en toneladas por mes. . . . .	164
D.14.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 2. . . . .	164
D.15.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 2. . . . .	164
D.16.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 2. . . . .	164
D.17.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 2. . . . .	165
D.18.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 3, en toneladas por mes. . . . .	180
D.19.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 3, en toneladas por mes. . . . .	181
D.20.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 3. . . . .	181
D.21.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 3. . . . .	181
D.22.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 3. . . . .	181

D.23.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 3. . . . .	182
D.24.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 4, en toneladas por mes. . . . .	197
D.25.Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 4, en toneladas por mes. . . . .	198
D.26.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 4. . . . .	198
D.27.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 4. . . . .	198
D.28.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 4. . . . .	198
D.29.Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 4. . . . .	199

# Índice de Figuras

1.1. Jerarquía para el manejo de residuos . . . . .	2
1.2. Estructura de ejemplo del caso actual. . . . .	7
1.3. Ejemplo de una posible solución factible del problema, añadiendo nodos propuestos a la estructura actual. . . . .	7
1.4. Ejemplo de superestructura, incluyendo todas las soluciones posibles. . . . .	8
1.5. Esquema resumen de la función multiobjetivo utilizada para el problema . . . . .	9
1.6. Representación del resultado obtenido, se indican los puntos donde se ubicarán los containers y el ruteo a realizar por los camiones . . . . .	9
1.7. Superestructura simplificada de una red de uso de agua. . . . .	11
1.8. Representación gráfica de un problema de optimización multiobjetivo (MOO). . . . .	12
1.9. Representación de la Frontera de Pareto. . . . .	13
2.1. Esquema de trabajo para la información actual de la comuna. . . . .	17
2.2. Gráfico toneladas por año producidas por la comuna de La Granja. . . . .	18
2.3. Gráfico caracterización de residuos sólidos domiciliarios comuna de La Granja (2018) . . . . .	18
2.4. Mapa ubicación de los puntos verdes de la comuna de La Granja. . . . .	19
2.5. Mapa de ubicación de otros puntos de distribución de la comuna de La Granja . . . . .	21
3.1. Esquema de trabajo para la selección de un residuo específico. . . . .	24
3.2. Caracterización de residuos sólidos domiciliarios de la comuna de La Granja, respecto al flujo volumétrico. . . . .	24
3.3. Caracterización de residuos plásticos de la comuna de La Granja, respecto a su masa y volumen. . . . .	25
4.1. Esquema de trabajo para la selección de tratamientos de reciclaje para el residuo plástico. . . . .	27
4.2. Proceso de reciclaje de GREENPLAST, empresa de reciclaje en Chile. . . . .	29
4.3. Opciones de tratamientos térmicos para los residuos sólidos. . . . .	31
5.1. Esquema de trabajo para determinar la división de la comuna. . . . .	34
5.2. Mapa de la comuna de La Granja. División por franjas realizada. . . . .	35
5.3. Esquema general del modelo actual o solución actual del sistema. . . . .	36
6.1. Mapa con las ubicaciones de algunos de los microbasurales. . . . .	40
6.2. Esquema general de la superestructura. . . . .	41
6.3. Esquema explicativo de todas las soluciones posibles del problema. . . . .	42

7.1. Esquema de trabajo para realizar la formulación del problema. . . . .	44
8.1. Esquema de trabajo para obtener la solución del problema de optimización. .	66
8.2. Soluciones óptimas para el problema 1. . . . .	67
8.3. Soluciones óptimas para el problema 2. . . . .	68
8.4. Acercamiento a soluciones del problema 2. . . . .	69
8.5. Soluciones óptimas para el problema 3. . . . .	70
8.6. Soluciones óptimas para el problema 4. . . . .	72
8.7. Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 1. .	73
8.8. Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 2. .	75
8.9. Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 3. .	77
8.10. Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 4. .	78
B.1. Representación gráfica de la solución actual. Se muestran todas las conexiones existentes entre los elementos del sistema. . . . .	97
B.2. Esquema de trabajo para realizar el balance de masa del modelo actual. . . .	98
B.3. Esquema balance de masa de las franjas a sus destinos. . . . .	99
B.4. Esquema balance de masa en los puntos verdes. . . . .	100
B.5. Esquema balance de masa en PLA. . . . .	102
B.6. Esquema balance de masa en CA. . . . .	102
B.7. Esquema balance de masa en ET. . . . .	104
B.8. Resumen balance de masa global. . . . .	105
C.1. Representación gráfica de la distribución de puntaje escenario 1. . . . .	116
C.2. Representación gráfica de la distribución de puntaje escenario 2. . . . .	117
D.1. Ejemplo de cálculo para el método de programación por metas. . . . .	128



# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente en Chile se producen 7,5 millones de toneladas de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) al año, según cifras indicadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo para el año 2017. Del total nacional, en la Región Metropolitana se generan 3 millones de toneladas de RSD, aproximadamente, lo que corresponde al 41,85 % del total producido a nivel nacional [1].

A lo mencionado, se debe considerar la insuficiente capacidad que se presenta tanto en vertederos como en rellenos sanitarios, es decir, la vida útil que estos lugares poseen. Actualmente, la Región cuenta con 3 rellenos sanitarios y un vertedero, siendo los más importantes los rellenos sanitarios Loma Los Colorados y Santa Marta, que poseen una vida útil de 50 años (opera desde 1996) y 20 años (desde 2002), respectivamente [2] [3].

El problema de la capacidad y la falta de gestión de residuos ha promovido la creación de más de 70 vertederos ilegales en la región, siendo peligrosos la mitad de ellos, debido a que no cuentan con las mediadas necesarias mínimas establecidas en el decreto supremo 189 [3], que corresponde al reglamento de las condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios, destacando principalmente la preocupación por la formación de lixiviados y biogás, nocivos para la salud y el medioambiente [4].

Cabe destacar que dicho problema se asocia también al costo que tiene contratar a una empresa para el transporte y disposición de los residuos, por lo que algunas empresas prefieren disponer sus residuos en lugares no autorizados [5]. Frente a todo esto ¿qué otras alternativas se pueden plantear para evitar que gran parte de los residuos sean dispuestos en rellenos y vertederos?

Para poder responder a la interrogante planteada, es necesario hacer mención a la *Ley N° 20.920 Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP)*, que corresponde a un instrumento económico de gestión de residuos que obliga a los productores a organizar y financiar la gestión de residuos derivados de sus productos. Para lograr el principal objetivo de la ley, se debe tener presente la *Jerarquía para el manejo de residuos*, que se ve representada en la Figura 1.1.

Esta jerarquía [6] promueve que la eliminación de los residuos sea la alternativa menos utilizada, prefiriendo una gestión de residuos eficiente, entendida como el conjunto de las operaciones de manejo y otras acciones de planificación, de evaluación, seguimiento y fiscalización, referidas a residuos. En otras palabras, la gestión se ve reflejada por mecanismos de prevención de generación de residuos, su reutilización y reciclaje (o de sus componentes) y la valorización energética de los mismos. De manera concreta, uno de los mecanismos se refiere a la separación en origen y recolección selectiva de residuos, siendo esta una obligación para los municipios del país [7] [8].



Figura 1.1: Jerarquía para el manejo de residuos [6].

Si bien el problema de la gestión de residuos debe ser resuelto por las municipalidades, existe una variedad de alternativas para el tratamiento y logística de transporte de residuos. Este tipo de problemas están abiertos en la Región Metropolitana. La búsqueda de la mejor alternativa para una comuna constituye el foco de atención de este trabajo.

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. Proceso Actual

Actualmente la Región Metropolitana abarca una gran cantidad de comunas que se administran de manera autónoma. Es por esta razón que al crear una metodología para resolver la problemática de gestión de residuos en sólo una de ellas, permite en consecuencia, proponer una estrategia de solución para toda la región, ya que sólo bastaría con replicar la metodología utilizada.

Para poder elegir la comuna de estudio, es necesario establecer criterios de selección, para ello se consideran dos factores:

- Que la comuna seleccionada cuente con una base de datos amplia disponible, debido que para realizar la posterior optimización será necesario contar con una gran cantidad de información para obtener un resultado apropiado.
- Que la comuna cuente con interés en temas de gestión de residuos, es decir, que existan distintos programas o actividades que fomenten la participación ciudadana respecto

a temas de reciclaje y/o reutilización de residuos. De esta manera, si la comuna está interesada en temas de mejorar el manejo de sus residuos es posible que esté interesada o preparada para implementar la metodología que se obtenga de este trabajo.

Considerando los factores indicados, se escoge trabajar con la comuna de *La Granja* que cuenta con un estudio realizado por ingenieros de la Universidad de Santiago de Chile [9], respecto a la caracterización de sus residuos, y además, posee programas como *Recicla en tu barrio* y *Programa de Reciclaje Escolar* que promueven el reciclaje en la comuna [10].

Actualmente, esta comuna posee una Producción Per Cápita (PPC) diaria de RSD igual a 1,56 [kg], lo que se traduce a una producción de 66 mil toneladas al año, según las cifras obtenidas para el año 2017 [1]. Por otro lado, es importante destacar que la comuna cuenta con 28 puntos verdes y 1 punto limpio, en los que se clasifican plástico, papel, cartón, vidrio, latas y chatarras [11]. Además, posee Certificación Ambiental Municipal Nivel Básico desde el año 2017 [12] y están participando para recibir la Certificación Intermedia [13].

La Granja cuenta con un contrato hasta el año 2020 con la empresa *Transportes S.A.*, que brinda el servicio de transporte de los residuos, disponiendo de 8 camiones para dicha labor. Dichos camiones realizan el retiro 3 veces a la semana entre las 7 y 17 horas. También se realiza una recolección diferenciada en la comuna, 1 vez a la semana. Finalmente, los residuos retirados en la comuna, en su mayoría son dispuestos en el relleno sanitario Santa Marta [1].

### 1.1.2. Tratamientos existentes en la comuna de La Granja

Además de la disposición final en los rellenos sanitarios existen otros mecanismos para valorizar los residuos, que comprende la reutilización, reciclaje y valorización energética.

Existe una gran variedad de tecnologías para valorizar residuos, las cuales son difíciles de clasificar debido a todas las combinaciones de tecnologías existentes que pueden dar origen a distintos tipos de proyectos de valorización. Sin embargo, es posible definir una serie de proyectos para el uso de residuos y que han alcanzado un alto grado de madurez tecnológica. Algunos ejemplos de proyectos se presentan en la tabla 1.1.

A continuación, se describen los proyectos presentados en la Tabla 1.1 [14]:

- a. Planta de compostaje: Instalación de valorización donde los residuos orgánicos son reciclados y transformados en compost (usado en el mejoramiento de suelo).
- b. Planta de incineración: Instalación de valorización energética, donde se incineran de manera controlada los residuos a altas temperaturas, logrando una reducción del volumen. Los productos obtenidos son agua, cenizas y/o energía eléctrica.
- c. Punto verde: Instalación de tamaño reducido, que cuenta con contenedores en lugares de acceso público como plazas, supermercados, iglesias, condominios, entre otros. En dichos lugares la ciudadanía realiza una entrega de sus residuos separados. Aquí no se realiza un pretratamiento.



- d. Punto limpio: A diferencia del punto verde, es una instalación de mayor tamaño, que cuenta con un espacio físico para contenedores, donde se reciben y acumulan selectivamente residuos entregados por los ciudadanos, para su valorización posterior. Aquí sí se puede realizar un pretratamiento.
- e. Planta de transferencia: Instalación donde se lleva a cabo el transbordo de residuos, desde vehículos recolectores a los vehículos de carga de gran tonelaje.
- f. Centro de acopio: Instalación intermedia, de almacenamiento temporal de los residuos, los cuales provienen de hogares, puntos verdes o limpios, con o sin pretratamiento, para poder ser valorizados posteriormente.

Tabla 1.1: Algunos tipos de proyectos de valorización [14]

Tipo de instalación	Proyecto	Tipo de residuo a tratar
Reciclaje	Planta de compostaje	Orgánicos
Valorización energética	Planta de incineración	Orgánicos, plásticos, cartón, papel, otros.
Intermedia (acumulación)	Punto verde	Papeles y cartones, metales, plásticos, vidrio.
	Punto limpio	Papeles y cartones, metales, plásticos, vidrio.
		En algunos casos con certificaciones especiales: residuos electrónicos, baterías, y otros residuos peligrosos.
	Centro de acopio	Orgánicos, cartón y papel, metales, plásticos, vidrio. Dependiendo del centro de acopio, también pueden recibir otros tipos de residuos.
Estación de transferencia	Todo tipo de residuo: cartón y papel, metales, plásticos, vidrio, líquidos, aceites, neumáticos, muebles en desuso, etc.	

De los mencionados anteriormente, La Granja cuenta con: un centro de acopio, 28 puntos verdes y 2 puntos limpios, según los datos entregados por el SEREMI de Medio Ambiente de la Región [15]. Además, en el centro de acopio poseen una planta de compostaje de residuos orgánicos.

En marco de la ley REP, es necesario considerar qué tipo de tratamientos se realizan actualmente a los residuos que se generan, en particular a los productos prioritarios, los cuales corresponden a *sustancias u objetos que una vez transformados en residuos, por su volumen, peligrosidad o presencia de recursos aprovechables, es necesario hacerse responsables de su valorización* [7].

Según el *Artículo 10 de la ley REP*, los productos prioritarios corresponden de manera particular a [7]:

- i. Aceites lubricantes.
- ii. Aparatos eléctricos y electrónicos.
- iii. Baterías.
- iv. Envases y embalajes.

v. Neumáticos.

vi. Pilas.

Este trabajo se enfocará en la categoría de *Envases y embalajes*. Los principales usos y tratamientos que se entregan a estos se enumeran a continuación [16]:

1. Papel y cartón: Existen empresas ubicadas en la región, que actualmente se encargan de reciclar estos materiales, utilizando papeles limpios de materias orgánicas u otros contaminantes. Principalmente, el papel y el cartón se enfardan y se genera fibra de papel reciclado.
2. Plástico (envases plásticos): Dependiendo del tipo de plástico, se obtienen distintos productos a partir del reciclaje realizado.
  - i. Polietileno tereftalato (PET): Se convierte en fibras para relleno de sacos de dormir, alfombras, cuerdas y almohadas.
  - ii. Polietileno de alta densidad (HDPE): Se convierte en maceteros, contenedores de basura y botellas de detergente.
  - iii. Cloruro de polivinilo (PVC): Se convierte en tubos de drenaje e irrigación.
  - iv. Polietileno de baja densidad (LDPE): Se convierten en bolsas de supermercado.
  - v. Polipropileno (PP): Se convierten en cajas de baterías para auto, viguetas de plástico, peldaños para registros de drenaje.
  - vi. Poliestireno (PS): Utilizado para la fabricación nuevos productos.
  - vii. Cualquier otro tipo de termoplástico (OTHER): No son reciclables, porque no se sabe qué resinas contiene.
3. Metales (aluminio y envases de hojalata): Este material es principalmente fundido para que luego pueda ser utilizado en la confección de nuevos productos.
4. Vidrio: Las empresas de la región se encargan de la industrialización de vidrio reciclado.

En La Granja se encuentran 2 empresas intermedias de valorización: *Cecilia Mora Ramírez* encargada de la *recepción, selección, almacenamiento y comercialización de residuos no peligrosos, consistentes en chatarra metálica: acero inoxidable, aluminio, bronce y cobre*; y *Eco-Activos E.I.R.L.* la que realiza *recepción, almacenamiento, tratamiento y comercialización de residuos no peligrosos consistentes en plásticos de tipo PET, PEAD, PEBD, PELBD, PP, PS y artículos de plástico industrial* [16].

### 1.1.3. Representación de red de tratamiento de residuos

Este problema busca encontrar la mejor solución para la gestión de residuos que tiene actualmente la comuna, proponiendo el diseño de una red de tratamiento óptima, considerando indicadores de tipo económico y ambiental.

Como se busca la mejor solución, este problema puede plantearse como un problema de optimización, el cual se representa con una función objetivo generada a partir de algún indicador y que está sujeta a restricciones. Es por esto, que los indicadores son necesarios, ya que permiten dar paso al planteamiento de una expresión matemática para las funciones objetivo, con el propósito de que representen lo que se busca en el problema.

Para poder buscar y encontrar la mejor solución, es necesario modelar el problema, es decir, representar las relaciones entre los distintos elementos del sistema y las soluciones alternativas que se tendrían para dar respuestas al problema que se plantea. Es por este motivo que es necesario establecer la superestructura, o conjunto de soluciones factibles del problema.

#### Superestructura

Para poder diseñar la red, primero se deben determinar los participantes actuales del sistema de distribución de los residuos, en este caso se podrían considerar los habitantes de la comuna de La Granja (distribuidos en villas), los puntos limpios y el relleno sanitario. Todos los participantes estarán conectados en una red. Los participantes y la red serán representados por *nodos y arcos*, respectivamente, dando como resultado una representación gráfica del sistema actual de la comuna [17].

A modo de ejemplo, como se observa en la Figura 1.2, si la comuna contara con 5 *villas* (representadas por los nodos V1 a V5 en la figura), se puede considerar que algunas de ellas separan sus residuos en reciclables y no reciclables, es decir, existen salidas de flujo reciclable (arcos de color amarillo) que se dirigen al *punto limpio* representado por el nodo *PL1*, y también existen salidas de flujo no reciclable (arcos de color negro) que se dirigen al *relleno sanitario* representado por el nodo *S1*. Por otro lado, también podrían existir villas que no separen sus residuos, existiendo sólo un arco entre una determinada villa y el relleno sanitario [18].

Como se espera encontrar una red óptima, es decir, se quiere buscar la manera de reducir el flujo de llegada al relleno sanitario, ¿basta con un sólo punto limpio? La respuesta es: probablemente no. Es por esto que se deben buscar nuevos puntos limpios o nuevas estaciones de tratamiento, en otras palabras, nuevos nodos que agregar. Como se observa en la Figura 1.3, se pueden agregar nuevos nodos, como puntos limpios y *puntos de tratamiento* que se ven representados por los nodos *T* (del T1 al T4, porque puede existir una variedad amplia para tratar un residuo particular, como se menciona en la sección anterior).

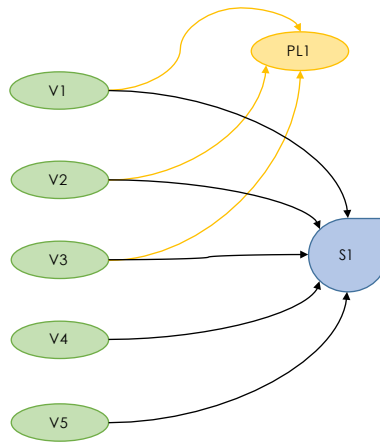


Figura 1.2: Estructura de ejemplo del caso actual.

En la representación de la Figura 1.3, se realizaron conexiones entre los nodos existentes y los propuestos, sin embargo, esta es una de las posibles configuraciones y se debe tener en cuenta que existen una gran cantidad de soluciones factibles.

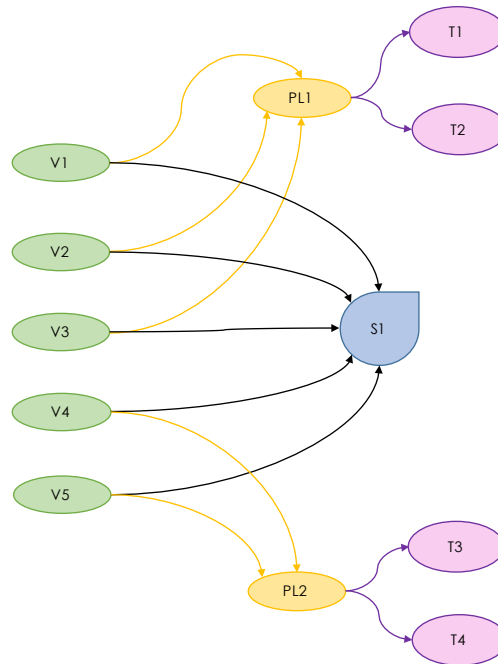


Figura 1.3: Ejemplo de una posible solución factible del problema, añadiendo nodos propuestos a la estructura actual.

Una *superestructura* es una representación gráfica de todas las soluciones factibles, utilizando un grafo compuesto por nodos y arcos. Un ejemplo de este tipo de estructura es la Figura 1.4, donde se pueden apreciar todos los arcos posibles entre los distintos nodos. Volviendo a los objetivos propuestos, la idea es poder determinar cuál de todas las configuraciones posibles es la óptima, y con este propósito se deberá formular el problema de optimización [18].

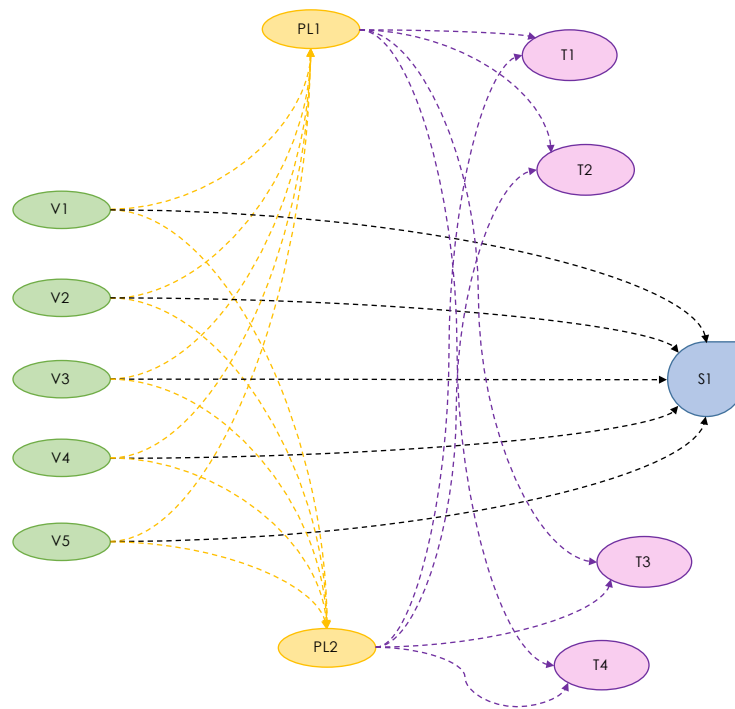


Figura 1.4: Ejemplo de superestructura, incluyendo todas las soluciones posibles.

#### 1.1.4. Estado del arte

Una vez construida la superestructura, es necesario establecer cuál es la mejor solución del problema. Para ello se puede plantear un problema de optimización. En este caso, las funciones objetivo corresponden a una composición de indicadores que se hayan seleccionado. El problema quedará modelado también mediante restricciones, que pueden dar cuenta de aspectos físicos, como por ejemplo la conservación de masa, o aspectos prácticos, como podría ser que un camión sólo puede abastecer un sector de cierto tamaño al día.

A continuación, se explicarán algunos ejemplos que han aplicado métodos de optimización en procesos similares al que se va a abordar en este trabajo.

#### Ubicación de contenedores de reciclaje en Taiwan

En un distrito de la ciudad de Kaohsiung, Taiwan, querían determinar el mejor patrón de ubicación de containers de reciclaje. Para ello consideraron trabajar con una función multiobjetivo, que considerara tres principales objetivos (indicadores) [19]:

- i. Maximizar la población que puede contar con el servicio de los containers.
- ii. Minimizar la distancia total de caminata de los residentes, desde su casa al container, lo más posible dentro de la red de colección de los residuos.
- iii. Minimizar las distancias recorridas por los camiones al realizar su ruta.

Todo lo anterior sujeto a 6 restricciones adecuadas al problema. La función se representa en la Figura 1.5 [19].

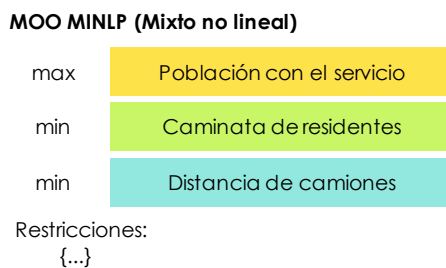


Figura 1.5: Esquema resumen de la función multiobjetivo utilizada para el problema [19]

Para poder resolver el problema planteado se utilizó un sistema de Información Geográfica (GIS) junto a un Algoritmo Genético, obteniendo un conjunto de soluciones factibles. Se decidió considerar aquella que lograra la mayor cantidad de residuos recolectados, obteniendo así un resultado de instalar 31 containers en lugares determinados, junto con el ruteo de los camiones, ver Figura 1.6 [19].

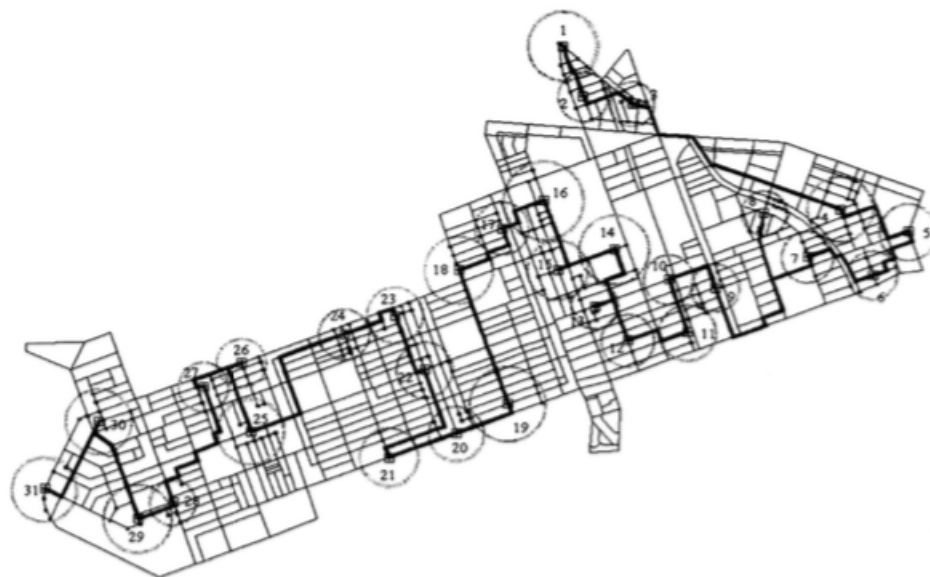


Figura 1.6: Representación del resultado obtenido, se indican los puntos donde se ubicarán los containers y el ruteo a realizar por los camiones [19].

### Casos particulares: Chile

En Chile, el tema respecto a la gestión de residuos ya ha estado presente en algunos estudios realizados por estudiantes de ingeniería, sin embargo, estos estudios han estado enfocados en establecer posibles mejoras del sistema pero no en su optimización [20][21].

Un caso más cercano es la memoria realizada por Camila Aylwin el año 2017, que abordó la evaluación de un plan de gestión de RSD en la comuna de Cochamó. Este trabajo también propuso una heurística para resolver el problema de una manera ordenada, aunque no garantiza optimalidad. Es la gran carencia de las heurísticas. Se entrega una solución factible, aunque no óptima [22].

El ejemplo que más similitudes posee con el trabajo a realizar, es el proyecto *Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*, dirigido por el académico Felipe Díaz Alvarado en conjunto con un grupo compuesto por ingenieros y estudiantes. Este proyecto continúa en desarrollo, y lo que busca es formular y resolver un problema de optimización multiobjetivo para proponer cambios en la red de agua de la Región Metropolitana (RM), con principal foco en los impactos ambientales y económicos, y la resiliencia a la demanda de agua y a los efectos del Cambio Climático [17][23].

Como se puede observar en la Figura 1.7, se presenta la superestructura simplificada del problema de la red de agua en la RM. Se considera que en la actualidad es posible suplir las necesidades de la población respecto a este recurso, pero ¿qué ocurre con la agricultura y otras industrias? Existe un problema de escasez de agua y es necesario aprovecharla de la mejor manera, utilizando nuevos tratamientos que puedan entregar el agua en condiciones aptas para ser utilizada en otros procesos. Además del aprovechamiento, se debe considerar que el Cambio Climático tiene efectos en el caudal de agua disponible que se tendrá en los próximos años [17].

La función multiobjetivo de este problema considera dos indicadores importantes, uno económico y otro ambiental [23]:

- i. Minimizar el costo total de la red, correspondiente a lo invertido y a los costos de operación de todo el sistema.
- ii. Minimizar el Potencial de Calentamiento Global, que se cuantifica normalizando a  $CO_2$  equivalente las emisiones de gases de efecto invernadero.

## **Análisis comparativo del Estado del Arte**

En comparación a los problemas y soluciones presentadas, se puede identificar que:

- A. Respecto al caso general, la solución propuesta en dicho problema fue utilizar el Algoritmo Genético, que entrega una variedad de posibles buenas soluciones pero no necesariamente la óptima. En este trabajo, se busca encontrar y determinar una solución óptima para el problema planteado.
- B. Respecto a los casos en Chile, en comparación con la comuna de Cochamó, el estudio realizado fue netamente cualitativo para buscar posibles alternativas de solución. La metodología que será utilizada para este trabajo, contará con una optimización, por lo que el trabajo se realiza de manera cuantitativa.

C. En comparación con la optimización de la red de agua para la RM, si bien la metodología a utilizar es similar, los problemas varían, dado que el problema de gestión de residuos se pueden separar en varias *capas*. Por ejemplo, los plásticos podrían corresponder a una capa, los vidrios a otra, los papeles y cartones a otra; en contraste, el problema de optimización de la red de agua sólo cuenta con la capa de optimizar los flujos de agua. Además de eso, la red de agua abarca toda la RM, en cambio el trabajo propuesto sólo se enfoca en la comuna de La Granja, debido al funcionamiento independiente que posee cada comuna respecto a la gestión de residuos.

Es importante mencionar que es posible introducir el concepto de capa para dar cuenta de que los flujos materiales tienen características diferentes, insustituibles [24].

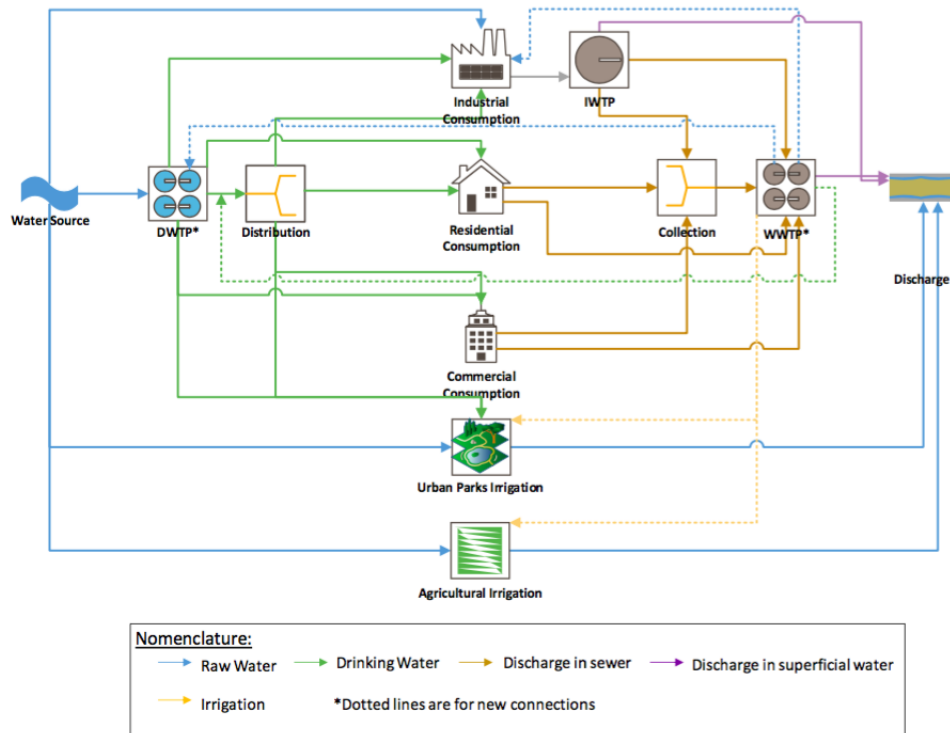


Figura 1.7: Superestructura simplificada de una red de uso de agua. [23]

### 1.1.5. Formulación del problema de optimización

Luego de generar una superestructura, lo que se espera es poder extraer la solución o estructura óptima, problema que puede ser planteado como uno de programación matemática [18].

Cuando las funciones o las restricciones son no lineales corresponden a un problema de programación no lineal (NLP) y en caso contrario, a un problema de programación lineal (LP) [18]. Por otro lado, si la función objetivo o las restricciones son funciones no lineales y el problema posee variables binarias, este corresponde a una *programación no lineal mixta*



(*MINLP*). En caso contrario, si la función objetivo junto a las restricciones son lineales, corresponde a *programación lineal mixta (MILP)*.

En el caso del problema a abordar en este trabajo es muy probable que corresponda a una programación mixta no lineal (*MINLP*). Podría ser mixta, debido a que se utilizarían variables binarias para determinar la existencia o no de los posibles nodos a fijar; y no lineal, debido a que se podría trabajar con flujos y composiciones variables.

Considerando que el problema del presente trabajo sea *MINLP* y posea distintos indicadores, la optimización multiobjetivo es una estrategia apropiada para tratar los diferentes indicadores como funciones objetivo [17], observar Figura 1.8.

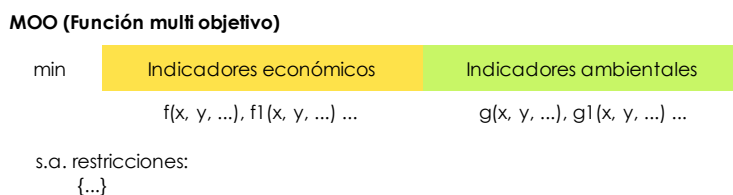


Figura 1.8: Representación gráfica de función multiobjetivo (MOO).

## Resolución del problema

Para poder resolver el problema de función multiobjetivo, es necesario utilizar una herramienta y un algoritmo de solución apropiados. En el caso del problema presentado, es muy probable que corresponda a uno de tipo *MINLP*, debido a que se trabajará con flujos y composiciones variables de residuos. De esta manera, se obtendrán funciones de tipo no lineales y no convexas, esto último se debe expresamente a términos del tipo  $X \cdot Y$ , ya que se están considerando variables de distinta naturaleza. Lo que ocurre con este tipo de problemas es que muchas de las herramientas utilizadas son capaces de encontrar mínimos locales y no mínimos globales, es decir, encuentran soluciones factibles pero no necesariamente la óptima.

Para abordar el problema se trabajará con el programa General Algebraic Modeling System (GAMS), un programa que provee un lenguaje orientado a la optimización y un conjunto de algoritmos de solución de alto rendimiento [25]. Un algoritmo apropiado para resolver problemas del tipo *MINLP* es *Branch-And-Reduce-Optimization Navigator (BARON)* de GAMS, específico para encontrar la solución global a problemas del tipo *NLP* y *MINLP* [26]. En caso contrario, si el problema a formular consiste en uno lineal de tipo *LP* o *MILP*, es posible utilizar *BARON* u otros algoritmos como *CPLEX* [25].

Es importante notar que un problema multiobjetivo no posee una única solución eficiente, más bien, cuenta con un conjunto de soluciones óptimas denominado *Frontera de Pareto* [27].

En el caso de un problema donde se quiere minimizar dos objetivos, que se pueden dibujar en un plano cartesiano, la frontera de Pareto se puede representar como se presenta en la Figura 1.9.

El área sombreada corresponde al espacio de soluciones posibles. De la Figura 1.9 se puede deducir que el punto C tiene menor valor en el objetivo en relación al punto B, pero tiene mayor valor que el punto D [27].

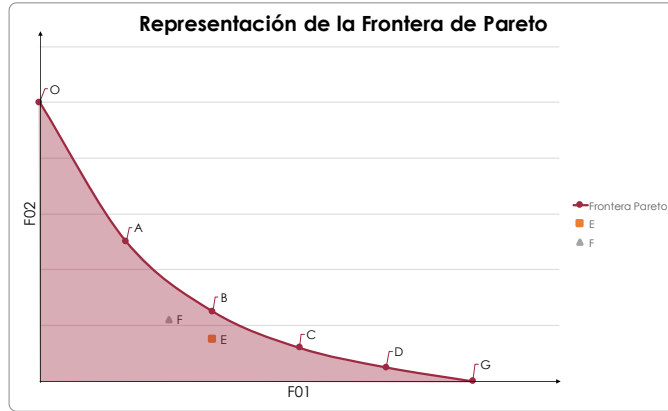


Figura 1.9: Representación de la Frontera de Pareto. [27]

Dentro de las técnicas para resolver los problemas multiobjetivo y poder encontrar la frontera, se encuentra la *Programación por metas*, método que tiene como propósito minimizar el nivel de desviación entre la meta lograda del objetivo y una meta inicialmente propuesta [27].

La formulación de este método queda expresado como se indica a continuación.

$$\begin{aligned}
 & \min_{x,y} \quad \gamma \quad s.a. \\
 & FO_{in}(x, y) \leq w_i \gamma \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \\
 & g(x, y) \leq 0 \\
 & h(x, y) = 0 \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

Con  $\gamma$  la distancia que se quiere minimizar entre la solución lograda y la propuesta, FO la función objetivo, g y h las restricciones propuestas, y  $w_i$  peso o importancia de cada función objetivo. Para el caso de la función objetivo, por temas de órdenes de magnitud, es recomendable trabajar con la forma normalizada como se presenta a continuación [27].

Los valores ideales se obtienen al optimizar cada función objetivo por separado, y el valor anti ideal es el valor obtenido de la función contraria a la que se está optimizando [27].

$$\begin{aligned}
 & w_i \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \\
 & FO_{in} = \frac{(FO_i^{ideal} - FO_i(x, y))}{(FO_i^{ideal} - FO_i^{anti-ideal})}
 \end{aligned}$$

## 1.2. Importancia del trabajo propuesto en el contexto

La importancia del trabajo a realizar radica en poder ofrecer una alternativa por medio de la ingeniería de procesos a la comuna de La Granja, buscando mejorar la forma en que gestionan sus residuos, disminuyendo los residuos que llegan como disposición final al relleno sanitario, lo que podría traducirse en una mayor vida útil al relleno Santa Marta, en disminuir la contaminación ambiental, en disminuir gastos respecto a transporte de residuos y un potencial beneficio social por el menor transporte de residuos por las calles de la comuna.

El trabajo propuesto no es un proyecto que se haya estudiado antes y puede constituir un antecedente importante para la solución de este tipo de problemas en otras comunas de Chile.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar una red óptima de tratamiento de residuos sólidos domiciliarios (RSD) para minimizar impactos negativos en la comuna de La Granja, considerando indicadores ambientales y económicos.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Estimar y/o recopilar información respecto a la magnitud de los flujos de residuos generados en la comuna y su composición de los flujos de residuos generados en la comuna, y los distintos puntos de distribución, separación, tratamiento y disposición final asociados a la comuna.
- Establecer residuos específicos a trabajar entre los clasificados como envases de productos prioritarios según la Ley REP.
- Establecer la superestructura y las restricciones del problema, considerando la estructura actual y la información recopilada y/o estimada sobre nuevos puntos de tratamiento.
- Definir los indicadores de impacto económico y ambiental para la formulación del problema de optimización.
- Formular y resolver el problema de optimización mediante el uso de una herramienta computacional (GAMS).
- Analizar los resultados obtenidos a partir de la optimización.
- Indicar recomendaciones a partir de los resultados y análisis realizados.

## 1.4. Alcances

Los alcances de esta memoria son detallados en los siguientes puntos:

- El estudio se contextualiza en la comuna de La Granja, seleccionada por su base de datos disponible. Se ha considerado especialmente la existencia de estudios respecto a la caracterización de los residuos de la comuna y la activa participación de las autoridades locales en la confección de programas que promueven el reciclaje en la comuna. Si bien la gestión de RSD podría ser abordada en todo Chile, se ha optado por proponer una estrategia de formulación y solución para una comuna. Este estudio podría ser una base para replicar la estrategia propuesta en otras comunas. Esto último, naturalmente, queda fuera de los alcances de este trabajo.
- Por otro lado, la optimización podría abordar la mejor solución en todo sentido. A este respecto, no es posible seguir todos los impactos de la gestión de residuos. Solo se considerarán algunos impactos económicos y ambientales que sean evaluados como principales por la autora. La inclusión de otros indicadores en el estudio podría mejorar la respuesta en versiones futuras.
- Finalmente, enfatizar que la optimización busca encontrar una distribución óptima del o de los residuos seleccionados, considerando nuevos puntos de reciclaje o de tratamiento.

# Capítulo 2

## Situación actual de la comuna y su representación gráfica

Antes de comenzar el trabajo, se deben conocer las características de la comuna, refiriéndonos a cómo se caracterizan los residuos que producen, a los flujos actuales que hay de cada tipo de material y también a cómo funciona el sistema de transporte y recolección de los mismos.

Este punto corresponde al primer objetivo específico mencionado en la Capítulo 1.

### 2.1. Metodología

De manera específica, la dinámica de trabajo a considerar para poder recopilar la información necesaria de la comuna se indica en los siguientes pasos:

1. Lo primero que se debe hacer para conseguir información respecto a la comuna es contactar directamente el departamento correspondiente al área de investigación, en este caso el Departamento de Aseo y Ornato de la comuna.
2. Una vez logrado el contacto, se debe manifestar la intención del proyecto y solicitar datos de la comuna que puedan ser útiles para el desarrollo del trabajo.
3. Para este caso es importante saber cómo se comporta la comuna respecto a la generación actual de residuos sólidos, en particular la cantidad de toneladas mensuales que producen y también su composición.
4. Por otra parte, también es importante cómo funciona el transporte y distribución de los residuos dentro de la comuna, a qué relleno sanitario llevan los residuos sólidos domiciliarios ( RSD), la empresa contratada para dicho servicio, con cuántos camiones disponen para el trabajo, los horarios y recorridos que realizan dichos camiones y el costo del servicio total.

5. También es importante conocer a qué otros puntos de distribución se trasladan los residuos segregados como: vidrio, papel, cartón, metales, plástico y tetra pack.
6. Una vez que se tienen las direcciones específicas de los distintos puntos de interés, es importante ubicarlos en el mapa de la comuna, con el fin de analizar la distribución de los mismos. Este proceso se puede llevar a cabo con las herramientas *Google Earth* o con la aplicación en línea *My Maps* también perteneciente a Google.

A modo resumen, en la Figura 2.1 se presenta un esquema de trabajo para poder recopilar la información actual de la comuna.

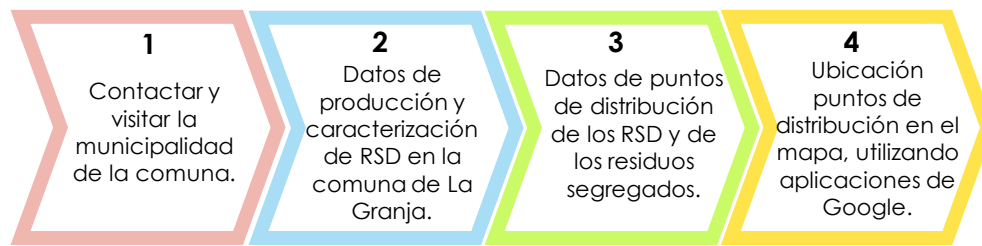


Figura 2.1: Esquema de trabajo para la información actual de la comuna.

## 2.2. Resultados

De acuerdo a lo que se indicó en la sección 2.1, el contacto con el Departamento de Aseo y Ornato con la comuna se realizó en un comienzo. Realizado esto, la municipalidad entregó un informe con información pertinente al reciclaje, recolección y transporte de los residuos. A continuación se presenta la información de mayor relevancia para el trabajo.

### 2.2.1. Caracterización de residuos sólidos domiciliarios comuna de La Granja

En la Figura 2.2 se presentan las toneladas de RSD producidas por la comuna entre los años 2008 y 2018.

La Tabla A.1 que se encuentra en Anexos, muestra los flujos de residuos generadas por la comuna en kilogramos, tanto de manera anual y mensual. Las mediciones presentadas en dicha tabla, fueron tomadas por la municipalidad de la comuna de estudio.

Por otro lado, de acuerdo a mediciones realizadas por la municipalidad de la comuna, la caracterización por mes de residuos sólidos domiciliarios de la comuna posee una distribución según como se presenta en la Figura 2.3. Los datos específicos se presentan en la Tabla 2.1.

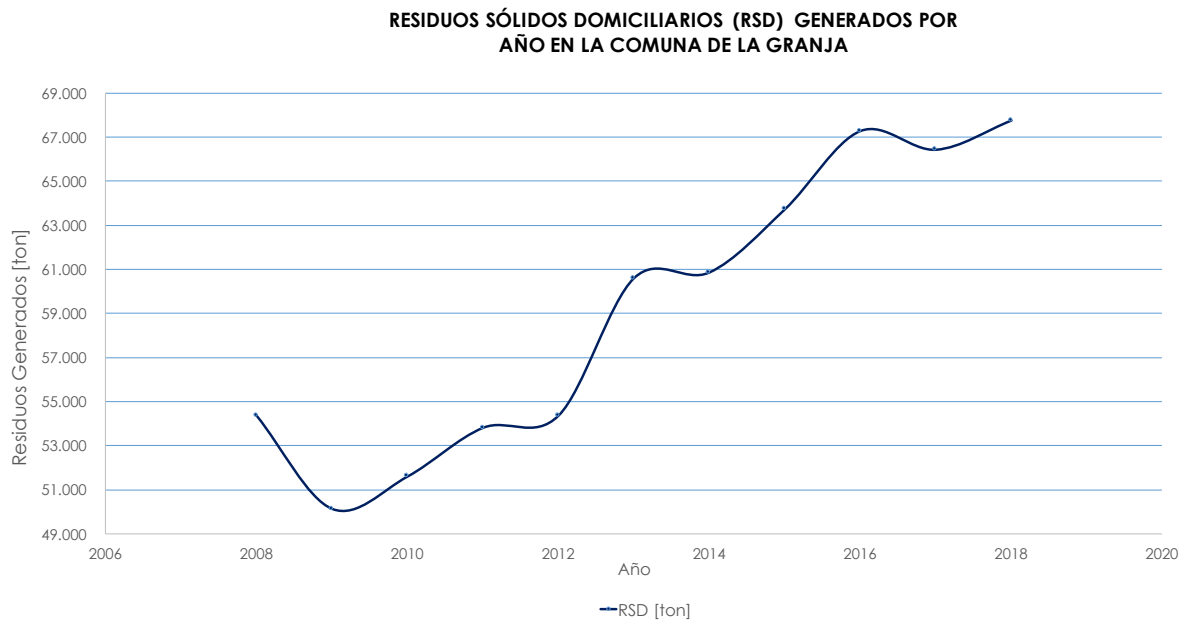


Figura 2.2: Gráfico toneladas por año producidas por la comuna de La Granja. (Elaboración propia con datos entregados por la comuna [13])

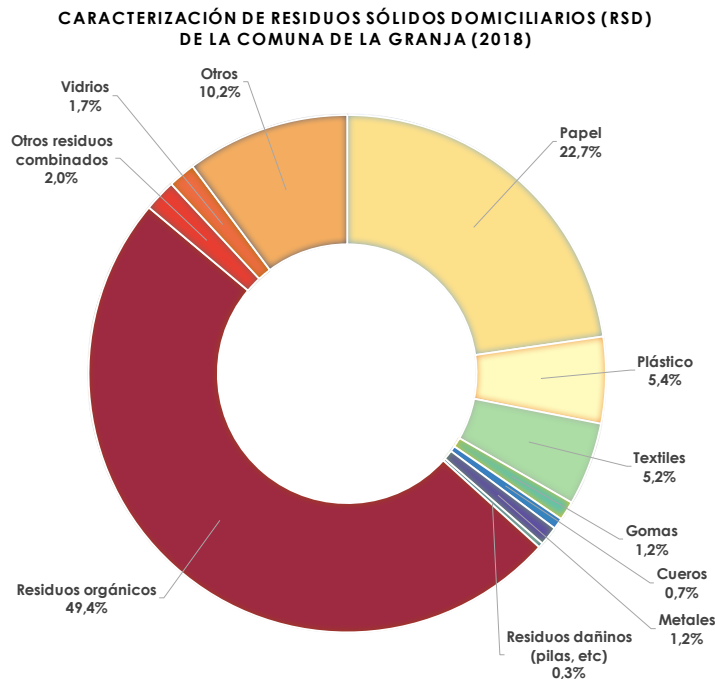


Figura 2.3: Caracterización de residuos sólidos domiciliarios de la comuna de La Granja, respecto al peso en toneladas. (Elaboración propia con datos entregados por la comuna [13])

Tabla 2.1: Caracterización residuos sólidos domiciliarios comuna La Granja, 2018 (Elaboración propia con datos entregados por la comuna [13])

Nº	Tipo de residuo	Masa [t/mes]	Porcentaje [%]
1	Papel	967	22,7
2	Plástico	230	5,4
3	Textiles	222	5,2
4	Gomas	51	1,2
5	Cueros	30	0,7
6	Metales	51	1,2
7	Residuos dañinos (pilas, etc)	13	0,3
8	Residuos orgánicos	2.104	49,4
9	Otros residuos combinados	85	2,0
10	Vidrios	72	1,7
11	Otros	435	10,2
<b>Total</b>		4.260	100,0

### 2.2.2. Puntos de distribución en la comuna

De acuerdo a lo presentado en el *Plan de gestión para el manejo de residuos sólidos* realizado por la municipalidad, los puntos verdes ubicados en la comuna se encuentran distribuidos en la comuna como se presenta en la Figura 2.4.

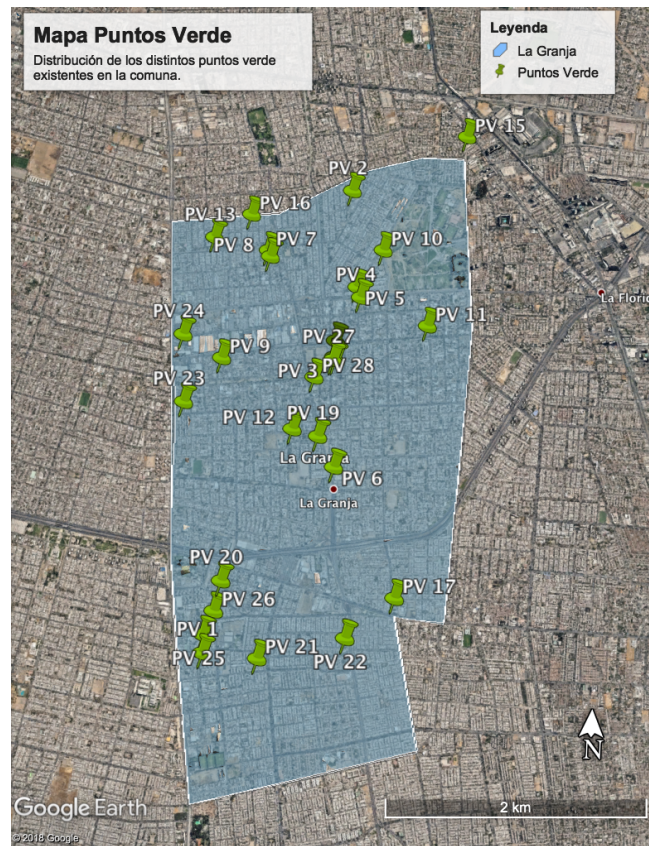


Figura 2.4: Mapa de ubicación de los puntos verdes de la comuna de La Granja. (Elaboración propia con datos obtenidos de Santiago Recicla [11])



En la Tabla 2.2 se presenta la información específica de cada punto verde, incluyendo su dirección y el tipo de material que recibe, información recopilada por la página de *Santiago Recicla* [11]. Además, se presenta el *código* asignado a cada punto verde para poder diferenciarlos entre ellos, desde este punto en adelante se diferenciarán los puntos verdes según este código asignado. Además, en capítulos futuros se hablará del conjunto de Puntos Verdes o PV, donde cada uno de los elementos mencionados en la Tabla 2.2 pertenecen a dicho conjunto.

Tabla 2.2: Direcciones y materiales recibidos por cada punto verde.

Código	Nº	Dirección	Materiales recibidos
PV	1	Avenida El Parque # 9330	Tetra Pack
PV	2	Calle M #65	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	3	Combarbala # 0575	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	4	Osorno # 0646	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	5	Yungai # 0641	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	6	Calle Raul S. Henríquez # 8283	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	7	Calle Presidente Alessandri # 0616	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	8	Calle Presidente Alessandri # 0629	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	9	Calle Illapel # 7875	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	10	Calle las Yucas # 6590	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	11	Calle Linares # 0875	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	12	Calle El Tabo # 8143	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	13	Calle Esteban Gumucio # 0141	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	14	Calle Quilpue # 7852	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	15	Punta Arenas# 6277	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	16	Calle 8 Oriente # 6447	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	17	Calle Coronel # 8960	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	18	Calle Quilpue # 7897	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	19	Calle 2 Poniente # 8177	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	20	Calle Diagonal Sur Oriente # 0351	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	21	Calle Canto General # 0501	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	22	Calle Manuel Plaza #0880	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	23	Santa Rosa 8002	Vidrios
PV	24	Santa Rosa 7668 P- 20	Vidrios
PV	25	Poeta Neruda # 0211	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	26	Pasaje Pedro Ignacio Gatica	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack, Aceites, Orgánicos
PV	27	Combarbala # 0575	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack
PV	28	Calle Serena # 7940	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack

En la Figura 2.5 se presenta el mapa con la ubicación de otros puntos de distribución de la comuna, que corresponden a un punto limpio, al centro de acopio, a la estación de transferencia Puerta Sur y al relleno sanitario Santa Marta.

Análogamente, en la Tabla 2.3 se presenta el código utilizado para nombrar a los distintos puntos, a diferencia de los puntos verde, los puntos de la Figura 2.5 no se ubican todos dentro de la comuna, así que se agrega una nueva columna para indicar la comuna en la que se ubica cada uno de los puntos de distribución.

Tabla 2.3: Información específica de otros puntos de distribución de la comuna.

Código	Nº	Dirección	Comuna	Tipo	Materiales recibidos
PL	1	Av. Américo Vespucio 002	La Granja	Punto Limpio	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack, Aceites
CA	0	Punta Arenas 6711	La Granja	Centro de Acopio	Papeles, Cartones, Vidrios, Latas, Plásticos, Pilas, Tetra Pack, Aceites, Orgánicos
ET	0	Av. General Velásquez 8990	San Bernardo	Estación de Transferencia	Todos
RS	0	Fundo Santa Helena de Lonquén	Talagante	Relleno Sanitario	Todos

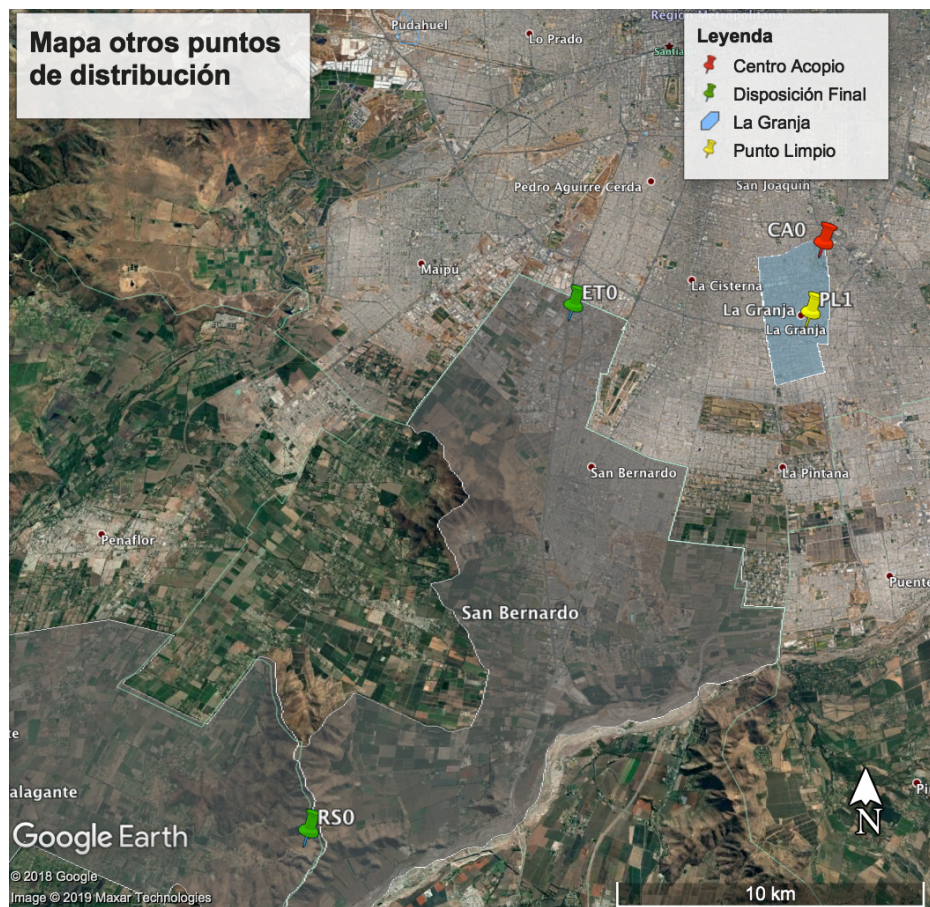


Figura 2.5: Mapa de ubicación de otros puntos de distribución de la comuna de La Granja. (Elaboración propia con datos entregados por la Municipalidad [13])

## 2.3. Discusiones

A partir del gráfico mostrado en la Figura 2.2, se observa que la generación de residuos en la comuna de La Granja ha ido en aumento hasta el año 2018, y además, se distingue de la Figura 2.3 que los residuos orgánicos son los que predominan en la caracterización de los residuos sólidos de la comuna, seguidos por el papel y plástico.

En cuanto a los puntos de distribución de la comuna, se observa en la Figura 2.4 que los puntos verdes están concentrados en sectores de la comuna y no distribuidos homogéneamente. Por otro lado, en la Figura 2.5 se puede ver que existe sólo un punto limpio y un centro de acopio, y que el relleno sanitario queda fuera de la comuna a una distancia sobre los 20 [km].

Es importante destacar que la información se obtuvo de dos fuentes principalmente [13] [11]. Si bien es posible contar con algunos datos para poder concluir el comportamiento de la comuna, la muestra o mediciones realizadas son escasas, sólo corresponden a un mes del año y no se tiene conocimiento a qué mes pertenecen, pudiendo ser el peor o mejor caso de La Granja. Si se tuviese un mecanismo estandarizado para caracterizar los residuos en distintos meses del año, se podría tener una mejor representación del sistema, pero esto puede implicar un gasto económico adicional que no se tiene considerado.

A pesar del gasto económico, puede ser relevante realizar un análisis del comportamiento de la comuna, con el fin de saber en qué tipo de residuos concentrar la gestión, o actividades relacionadas, y así poder disminuir la producción total de RSD.

# Capítulo 3

## Selección del residuo a estudiar

Una vez se conoce cómo funciona la comuna respecto a la generación y gestión de los residuos, se requiere establecer el residuo a tratar, como se indicó en los objetivos específicos del Capítulo 1. A continuación se presentará una estrategia para poder seleccionarlo y posteriormente, el resultado obtenido.

### 3.1. Metodología

Con el fin de simplificar el sistema y analizar sólo la dimensión de interés, es importante seleccionar el residuo con el que se trabajará. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Se deben identificar características que permitan filtrar entre los distintos materiales de interés. En este caso se considera como restricción la capacidad del vehículo de transporte, para ello entonces se considera el volumen de los residuos.
2. En el caso particular de este trabajo, se cuenta con una investigación previa realizada por estudiantes de la Universidad de Santiago (USACH), quienes realizaron mediciones en peso y volumen de distintos residuos en distintas viviendas de la comuna.
3. Con los datos obtenidos por el trabajo mencionado, es posible establecer un promedio en volumen de todos los residuos generados por una muestra de la población de la comuna.
4. Finalmente, los resultados del punto anterior serán comparados para seleccionar el mayor flujo volumétrico.

A continuación, en la Figura 3.1, se presenta el esquema resumen para la selección de residuo específico.

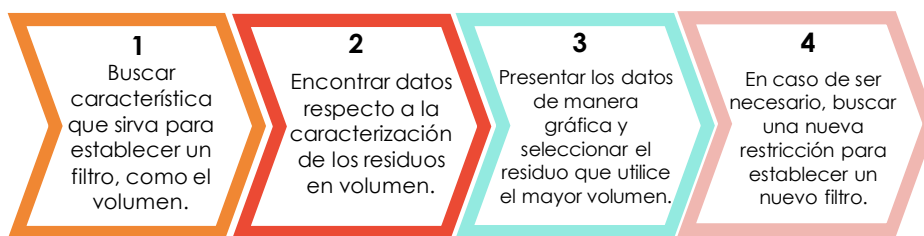


Figura 3.1: Esquema de trabajo para la selección de un residuo específico.

### 3.2. Resultados

La caracterización por tonelada es útil para saber cuáles son los tipos de residuos generados en mayor proporción en la comuna. Sin embargo, para hacer uso de los camiones, también se debe considerar la caracterización de los residuos respecto al volumen: ¿qué tipo de residuo utiliza mayor espacio en el sistema actual?

De acuerdo al trabajo de título *Implementación de un programa de caracterización y clasificación de residuos domiciliarios para la comuna de La Granja* [9], realizado por estudiantes de la Universidad de Santiago (USACH), se obtiene información de la caracterización por volumen de una fracción de la población de la comuna. Según lo medido durante una semana en distintas viviendas, los resultados muestran que el volumen se distribuye según se presenta en la Figura 3.2, a partir de los datos presentados en la Tabla 3.1.

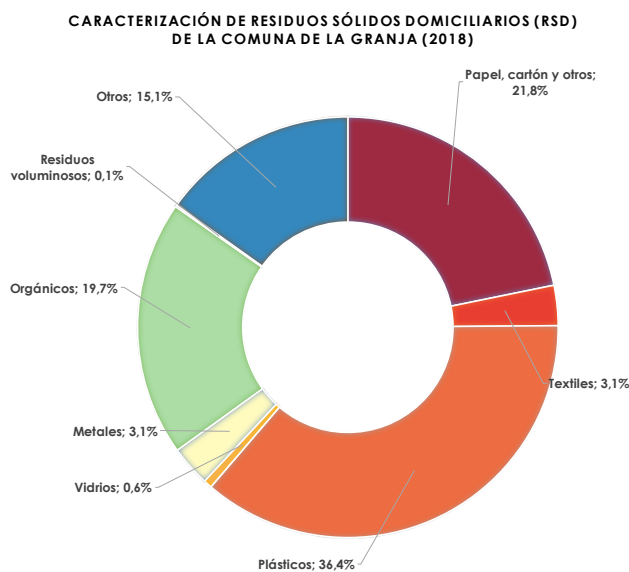


Figura 3.2: Caracterización de residuos sólidos domiciliarios (RSD) de la comuna de La Granja, respecto al flujo volumétrico. (Elaboración propia utilizando los datos del trabajo realizado en USACH [9])

Tabla 3.1: Caracterización de RSD de la comuna por semana, respecto al volumen.

Nº	Tipo de residuo	Volumen [L/semana]	Porcentaje [%]
1	Papel, cartón y otros	591,35	21,8
2	Textiles	83,67	3,1
3	Plásticos	987,77	36,4
4	Vidrios	17,55	0,6
5	Metales	85,03	3,1
6	Orgánicos	533,17	19,7
7	Residuos Voluminosos	3,70	0,1
8	Otros	410,90	15,1
<b>Total</b>		2.713,14	100,0

A partir del resultado anterior, los plásticos son el residuo que mayor volumen ocupa, y la composición de dicho volumen se distribuye en distintos tipos de plástico. La caracterización de los plásticos según su peso y volumen se presenta en la Figura 3.3. Por otra parte, en la Tabla 3.2 se presentan las densidades aparentes de los distintos tipos de envases plásticos. Estos datos también fueron obtenidos a partir del trabajo de título de referencia [9].

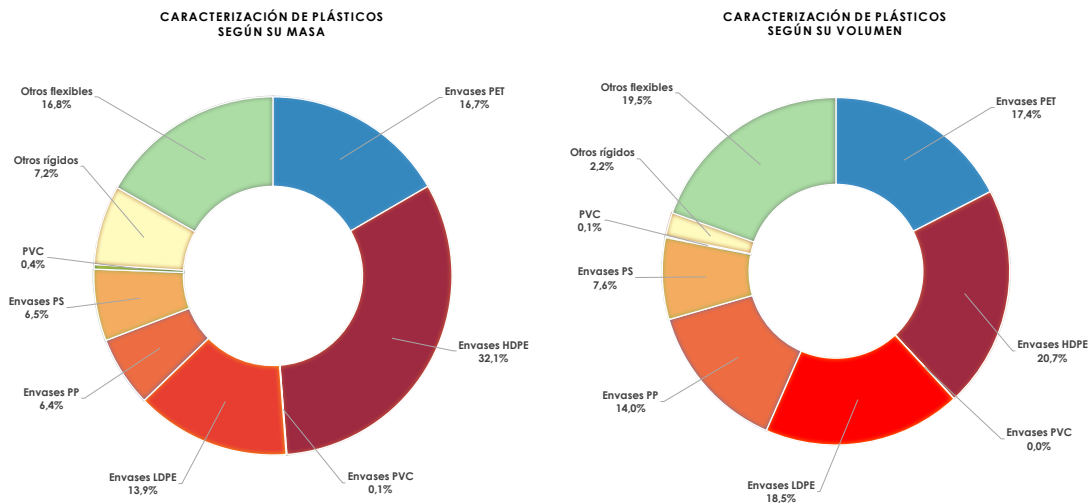


Figura 3.3: Caracterización de residuos plásticos de la comuna de La Granja, respecto a su masa y volumen. (Elaboración propia utilizando los datos del trabajo realizado en USACH [9])

Tabla 3.2: Densidad aparente de los distintos tipos de envases plásticos. (Elaboración propia utilizando los datos del trabajo realizado en USACH [9])

Nº	Tipo Plástico	Densidad Aparente [kg/L]
1	PET	0,03
2	HDPE	0,05
3	PVC	0,11
4	LDPE	0,02
5	PP	0,01
6	PS	0,03

### 3.3. Discusiones

A partir de la Figura 3.2 se puede concluir que los residuos plásticos son los que utilizan el mayor volumen, un aspecto importante al momento de considerar la capacidad de los camiones que transportan los residuos.

Si bien ya se obtuvo que el residuo plástico es el más relevante en cuanto al flujo volumétrico, existe una gran variedad de tipos de plásticos. Por lo tanto, es importante saber qué tipos de plástico representan la mayor proporción másica y volumétrica de flujo generado, de los que resultan ser los envases tipo PET y HDPE, Figura 3.3.

De esta manera, el residuo seleccionado a analizar es el plástico y se puede asumir que las propiedades que pueda tener el conjunto de este tipo de residuo son principalmente aquellas asociadas a los dos plásticos más relevantes. Con esto se obtiene que la densidad aparente podría ser el promedio entre el PET y el HDPE.

Si bien la selección se realizó a partir de la caracterización de residuos de la comuna, se podrían haber considerado otros criterios, como por ejemplo, los años en que demoran en descomponerse algunos de los materiales utilizados en la categoría de *Envases y embalajes*. Como se presenta en la Tabla 3.3, dentro de los ejemplos que aparecen, aquellos que requieren una mayor cantidad de años para descomponerse corresponden a los plásticos y vidrios, de lo que se puede concluir que son los residuos de mayor impacto en los rellenos sanitarios.

Tabla 3.3: Algunos materiales destinados a envasado, y sus respectivos años de descomposición. [28]

Material	Años descomposición
Caja de cigarrillos	1 - 5
Lata aluminio	80 - 200
Botella de plástico	450
Botella de vidrio	1.000.000

Según la información disponible, actualmente los vidrios corresponden al 82% de la capacidad de recolección en los puntos limpios del país, a diferencia del 3,4% de la capacidad de recolección del residuo plástico [29], es decir, si bien los vidrios tienen gran impacto en la disposición final, existe una gran brecha entre el manejo del vidrio y otros materiales de alto impacto como el plástico. Con esta información se puede concluir que es necesario realizar más actividades para promover el reciclaje de residuos plásticos. Corroborando esta información, según la *Asociación Gremial de Industriales del Plástico*, de los procesos de reciclaje plástico, sólo se utiliza un 48% de la capacidad instalada de molienda y un 57% de peletización [30].

# Capítulo 4

## Tratamientos disponibles para el reciclaje de plástico

Ahora que se ha seleccionado el residuo plástico, es necesario conocer qué tratamientos existen actualmente en el mundo para reciclarlos.

### 4.1. Metodología

A continuación se presentan los pasos a seguir para seleccionar los tratamientos del residuo plástico:

1. En primer lugar se debe realizar una búsqueda bibliográfica general respecto a los tratamientos de residuos plásticos.
2. Una vez que se tiene una noción general de los distintos tratamientos disponibles, es necesario profundizar sobre cada uno de ellos.
3. Finalmente, respecto a la información recopilada es posible seleccionar dos de los tratamientos presentados, indicando los argumentos pertinentes a dicha elección.

A continuación, en la Figura 4.1, se presenta el esquema resumen para la selección de tratamientos de residuo plástico.

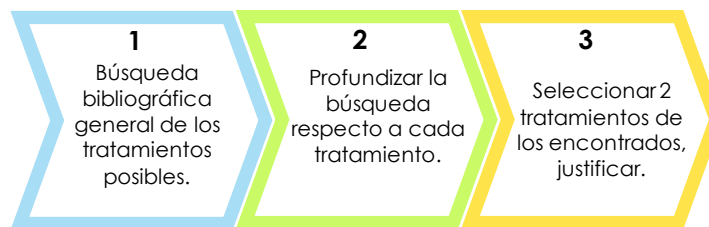


Figura 4.1: Esquema de trabajo para la selección de tratamientos de reciclaje para el residuo plástico.



## 4.2. Resultados

El método más común para reciclar el residuo plástico es el *reciclaje mecánico*. Este proceso comúnmente incluye la recolección, clasificación, lavado y molienda. Los pasos anteriores pueden ocurrir en diferente orden, muchas veces o ninguna, dependiendo del origen y composición del residuo [31].

A pesar de que existe el reciclaje mecánico, más de la mitad del plástico producido mundialmente termina en rellenos sanitarios o vertederos, una cantidad de masa considerable para ser utilizada en el proceso de revalorización energética. Sin embargo, este método es menos favorable desde un punto de vista medioambiental [7] [31].

Con el fin de poder tratar mayor flujo de plástico posible y ser responsable con el medio ambiente, ha aumentado el interés en utilizar un tipo de reciclaje menos frecuente: el *reciclaje químico*. Este método posee un gran potencial para tratar residuo plástico heterogéneo y contaminado, cuyo tratamiento mecánico es infactible en términos técnicos y económicos [31].

### 4.2.1. Reciclaje mecánico

Este método es el más utilizado para el reciclaje plástico, y emplea un tratamiento físico [32]. A continuación se profundizará respecto a este tipo de reciclaje.

#### Pasos en el proceso de reciclaje mecánico

Antes del reprocesamiento del material reciclado a productos nuevos, debe ocurrir la conversión de residuo a materia prima. Esta fase es generalmente nominada *Fin de la basura* (End of waste en inglés), y comienza luego de la recolección. El proceso de reciclaje plástico puede incluir los siguientes pasos [31]:

- a. Separación y clasificación: esto ocurre en base a la forma, densidad, tamaño, color o composición química.
- b. Empacado: si el plástico no es procesado donde es clasificado, generalmente es empacado entre los procesos de transporte.
- c. Lavado: remoción de contaminantes, comúnmente orgánicos.
- d. Molienda: reducción de tamaño del producto a hojuelas.
- e. Granulación: reprocesamiento opcional de las hojuelas a grano, que son más fáciles de usar para los convertidores que las hojuelas.

Un ejemplo del proceso de reciclaje que se lleva a cabo en Chile es el que realiza la empresa Greenplast. En la Figura 4.2 se presenta un esquema del proceso ejecutado por la empresa

[33].

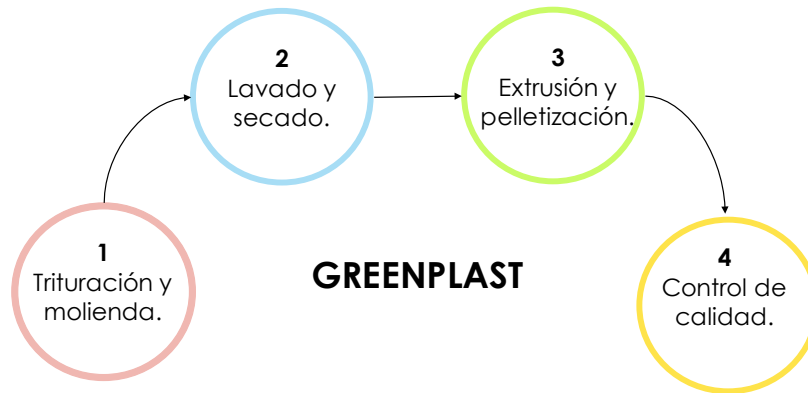


Figura 4.2: Proceso de reciclaje de GREENPLAST, empresa de reciclaje en Chile. [33]

### Principales desafíos relacionados con el reciclaje mecánico

El principal problema es la degradación de los polímeros bajo ciertas condiciones. Estas condiciones son, entre otras, el calor, oxidación, radiación iónica, hidrólisis y corte mecánico. Durante el reciclaje mecánico de los polímeros, prevalecen dos tipos de degradación: la causada por el reprocesamiento (degradación termo-mecánica) y la degradación durante la vida [31].

El primer tipo de degradación es causado por la combinación de calor y corte mecánico. Mientras que el segundo tipo es la degradación que ocurre durante la vida por un largo tiempo de exposición a todas las combinaciones de factores en el ambiente [31].

Otro punto a tratar, es que el reciclaje mecánico de plástico de diferentes composiciones conduce a la formación de mezclas de polímeros. La degradación térmica de estos es más compleja de tratar para el reciclaje mecánico, dependiendo de las características físico-químicas de la mezcla generada [31].

#### 4.2.2. Reciclaje químico

A continuación se presentarán diferentes tecnologías utilizadas para procesar el residuo sólido plástico. Estas consisten principalmente en la obtención o reciclaje de los monómeros o de la materia prima [31] [32].

#### Quimiólisis

El reciclaje químico es un método de reciclaje aceptado que sigue los principios de "desarrollo sostenible". El hecho de que los plásticos reciclados de manera química puedan

ser adecuados para aplicaciones alimentarias ha aumentado el interés en los distintos tipos de tratamientos por quimiólisis, como la metanólisis, hidrólisis y la glicólisis [31].

Este tipo de métodos de reciclaje están dando paso a utilizar los desechos como precursores en la generación de productos de valor agregado para diversas aplicaciones industriales y comerciales [31].

Como ya se indicó, el plástico obtenido a partir de estos procesos es más caro que el material virgen, a modo de ejemplo, existen estudios que demuestran que para poder tener una instalación de quimiólisis PET económicamente viable, se requiere de un flujo de entrada mínimo de 15 mil toneladas por año [31].

## Termólisis: Revalorización energética

Este tipo de tratamiento incluye tecnologías como la combustión, pirólisis y gasificación, dado que todos son procesos basados en una combustión completa o parcial, todos desarrollados a temperaturas altas, sobre 600 °C [34]. A continuación, se describen los distintos tratamientos y en la Figura 4.3 se presenta un esquema resumen de las tecnologías.

### 1. Combustión

- El uso de la *cámara de combustión con rejilla* es una tecnología madura, alrededor del 80 % de la capacidad de revalorización energética en el mundo se basa en ella, debido a su simplicidad de operación [35].
- Las plantas de *lecho fluidizado* son una tecnología madura, pero requieren preparación de combustible y es menos utilizada [34].
- La mayoría de las plantas recuperan el calor de los gases de combustión a través de una caldera de vapor. De esta manera se pueden lograr altas eficiencias térmicas [34].
- Es importante mencionar que la incineración es un proceso de combustión completa que se lleva a cabo con exceso de oxígeno, y que puede o no presentar recuperación de energía. En el segundo caso el nombre otorgado es *Waste to Energy* [35].

### 2. Gasificación

- Esta tecnología es emergente, sin embargo, está madura en ciertos países, particularmente en Japón [34].
- La gasificación se lleva a cabo en una atmósfera de oxígeno restringido, donde los residuos orgánicos, como plásticos, se transforman en un gas de síntesis (syngas), que puede ser utilizado en un motor o en una turbina, para generar electricidad. Pero este es un proceso desafiante y no se ha probado de manera comercial [34].
- La gasificación por plasma es una tecnología emergente, que opera con temperaturas por sobre los 1.000 °C en ausencia de oxígeno [34].

### 3. Pirólisis

- Tecnología que trata los residuos sólidos orgánicos a temperaturas moderadas a altas (500 °C, 1-2 atm) en ausencia de oxígeno [31], la cual tiene la capacidad de producir un gas limpio y de alto poder calorífico [32].
- Además del gas, el proceso también puede producir líquidos de petróleo crudo que pueden ser enviados a las refinerías para su posterior procesamiento [32].
- Otros productos del proceso son algunos sólidos como ceras y carbón. Además de productos de vapor que pueden ser utilizados para energizar el sistema [32].
- Desde el punto de vista ambiental, este método ofrece una alternativa a la disposición final en rellenos sanitarios, puede tratar mezclas de plástico que son más complejas de manejar con el tratamiento mecánico[31]. Por otro lado, como desventaja principal se encuentra el tratamiento del carbón generado y del combustible final producido en caso de requerir productos específicos[32]. Además, otra dificultad es que las reacciones que describen el proceso de pirólisis son muchas (tanto en serie como en paralelo), lo que hace complejo estimar la composición de la salida del proceso [31] .

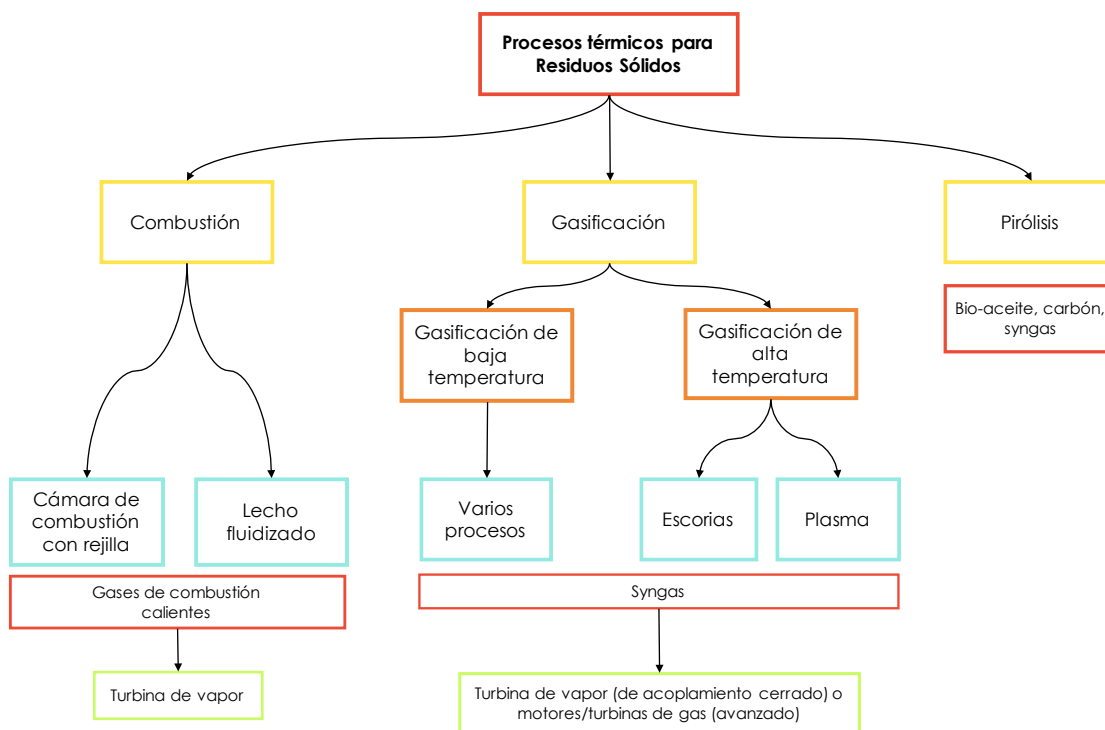


Figura 4.3: Opciones de tratamientos térmicos para los residuos sólidos. [34]

A partir de la información presentada, se seleccionarán dos tipos de tratamientos nuevos, posibles de instalar en Chile, sumándolos al tratamiento mecánico, debido a que es el único tipo de reciclaje que se realiza en el país actualmente [30].

### 4.3. Discusiones

En primer lugar, entre la quimiólisis y la termólisis, se descartan los tratamientos del primer tipo ya que se indica que para que sea un tratamiento rentable se deben tratar 15 mil toneladas por año, lo que está muy por sobre el flujo generado de plástico en la comuna (ver Tabla 2.1). Si se consideraran todos los residuos para tratar con quimiólisis, quizás podría ser una buena herramienta.

Respecto a la revalorización energética, la combustión es uno de los procesos más utilizados a nivel mundial, luego se tienen la gasificación y la pirólisis, que son preferibles a los procesos de combustión debido a sus menores emisiones potenciales [36]. De esta manera, parece atractivo seleccionar el tratamiento por combustión y el de pirólisis, sabiendo que estas tecnologías están más desarrolladas que el caso de la gasificación, como se explicó en los resultados.

Se debe considerar además como restricción la información disponible en la red, encontrando en su mayoría fuentes relacionadas a los tratamientos de combustión y pirólisis, de manera específica, se cuenta con estudios realizados suponiendo la instalación de dichos procesos en Santiago de Chile [35][32], contando así con datos o cálculos considerando una gran cantidad de supuestos pertinentes al contexto de estudio de este trabajo.

Para cerrar este capítulo, se tiene que el conjunto de los tratamientos de reciclaje del residuo plástico para este caso de estudio, estará compuesto por el tratamiento mecánico, la pirólisis y la combustión, siendo estas tecnologías maduras y ampliamente estudiadas, que podrían ser implementadas en la Región Metropolitana.

# Capítulo 5

## Modelo gráfico de la situación actual

Teniendo la información pertinente a la comuna, y la selección del residuo a estudiar en conjunto con los tratamientos disponibles para su reciclaje, es posible trasladar toda la información recopilada a una forma gráfica.

Antes de llegar a este punto, es necesario analizar la manera en que se analizarán los distintos sectores de la comuna, para lo que se deberá dividir en distintas franjas con el fin de poder controlar de mejor manera la información que se tiene actualmente y la que se obtendrá con los próximos resultados.

### 5.1. Metodología

#### 5.1.1. División de la comuna por franjas

Como ya se indicó, a continuación se explicarán los pasos para poder dividir la comuna de una manera que permita establecer de manera concreta toda la zona o área que podrían cubrir los distintos vehículos que participarán en el problema.

A modo de ejemplo, con el fin de poder establecer las distancias que podría recorrer el camión de reciclaje, es recomendable dividir la comuna en *franjas* y señalar posibles recorridos para cada una de ellas, asumiendo que posiblemente el camión partirá desde el centro de acopio, se dirigirá a una determinada franja y finalmente volverá al lugar de partida.

1. Actualmente la comuna se distribuye en 6 franjas para su control [13]. Como esta división entrega áreas muy grandes para poder analizar el problema, se propone subdividir las franjas a la mitad de su superficie, esto con el fin de poder controlar de mejor manera el comportamiento de los flujos o cantidad de plástico que se transporta desde las distintas zonas de la comuna.
2. Para poder dividir con mayor precisión, se debe utilizar Google Earth para poder estimar una distribución equitativa de las superficie de las franjas.

3. Una vez determinada la superficie de cada nueva franja, es posible utilizar la *densidad poblacional* de la comuna y así poder estimar la cantidad de habitantes que pertenecerá a cada división.
4. Finalmente, se puede sumar la población obtenida por cada nueva franja y calcular el total obtenido, para así comparar el porcentaje que se logra en contraste con la población total real.

A continuación, en la Figura 5.1 se presenta a modo resumen los pasos a seguir.

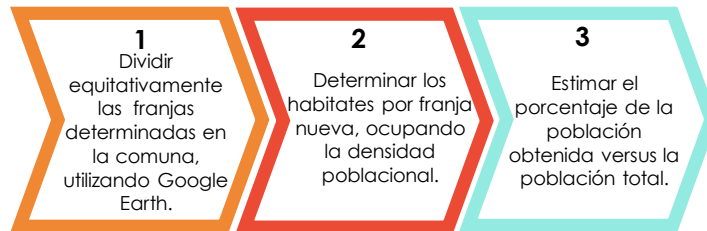


Figura 5.1: Esquema de trabajo para determinar la división de la comuna

### 5.1.2. Esquema modelo actual

Una vez que se tienen todos los datos de interés de la comuna se selecciona el residuo de estudio y se conocen los tratamientos que se podrían aplicar, es posible confeccionar un grafo con flujos conocidos, similar a un *flowsheet*.

1. Se deben establecer todos los conjuntos del sistema.
2. Además de los conjuntos, se debe determinar el comportamiento de los flujos del problema, es decir, considerar el conjunto de origen y el de destino de cada flujo. Para este punto resulta de utilidad realizar un balance de masa del flujo plástico.
3. Finalmente, se puede confeccionar un esquema gráfico de lo que ocurre actualmente en la comuna de La Granja.

## 5.2. Resultados

### 5.2.1. División de la comuna por franjas

Al dividir las 6 franjas existentes, procurando que la superficie sea equitativamente distribuida se obtiene el mapa que se presenta en la Figura 5.2. De esta manera, se generan 12 nuevas franjas, las que desde ahora serán elementos pertenecientes al conjunto de las Franjas o FR.

Tabla 5.1: Descripción específica de cada una de las franjas de la comuna. (Elaboración propia utilizando Google Maps)

Código	Nº	Franja	Superficie [ $km^2$ ]	Población [habitantes]
FR	1	1.1	1,19	13.749
FR	2	1.2	1,20	13.864
FR	3	2.1	0,96	11.091
FR	4	2.2	0,96	11.091
FR	5	3.1	1,00	11.554
FR	6	3.2	1,00	11.554
FR	7	4.1	0,75	8.607
FR	8	4.2	0,74	8.550
FR	9	5.1	0,46	5.257
FR	10	5.2	0,47	5.430
FR	11	6.1	0,65	7.452
FR	12	6.2	0,64	7.394
<b>Total</b>				115.594

El código de las franjas de FR1 a FR12 y su zona correspondiente se explicita en la Tabla 5.1, además se indica la superficie por sector y los habitantes respectivos, utilizando la densidad poblacional que corresponde a 11.553,6 habitantes por [ $km^2$ ]. Siendo la población total igual a 116.571 habitantes, que corresponden al 99,2% del total.

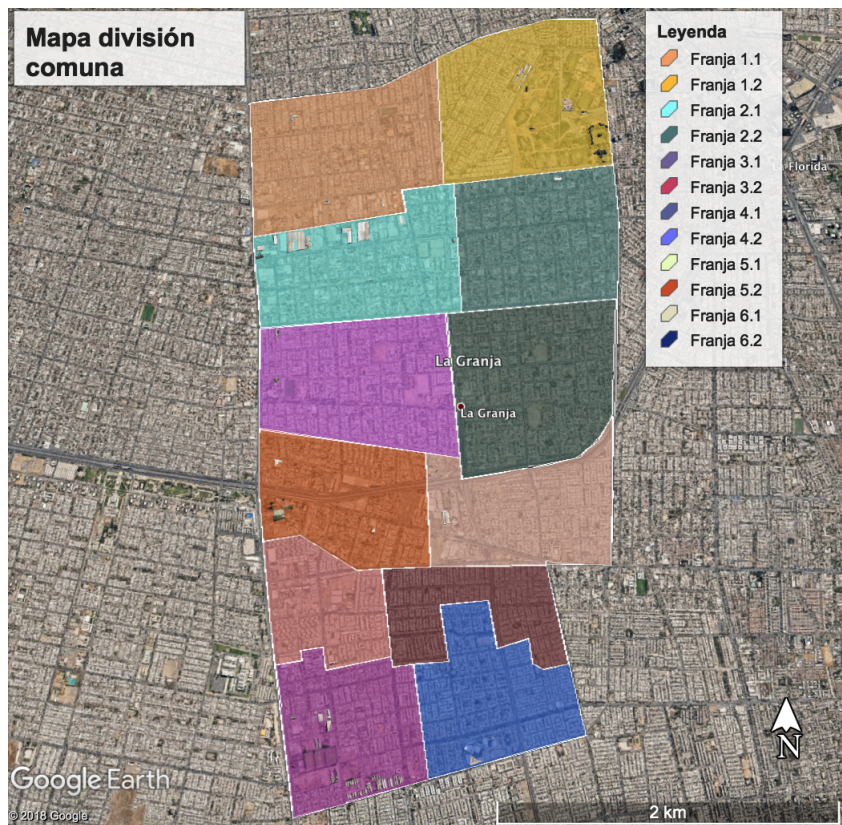


Figura 5.2: Mapa de la comuna de La Granja. División por franjas realizada. (Elaboración propia utilizando Google Maps)



## 5.2.2. Esquema modelo actual

Es importante tener en cuenta que el funcionamiento actual de la comuna, es una de las configuraciones que representa una posible solución del sistema a estudiar. La representación gráfica de esta solución queda expresada en la Figura 5.3. Este modelo representa de manera aproximada lo que ocurre en la comuna de La Granja. Para ver la estructura con los elementos y todos los flujos participantes, se puede ver en la sección de Anexos la Figura B.1.

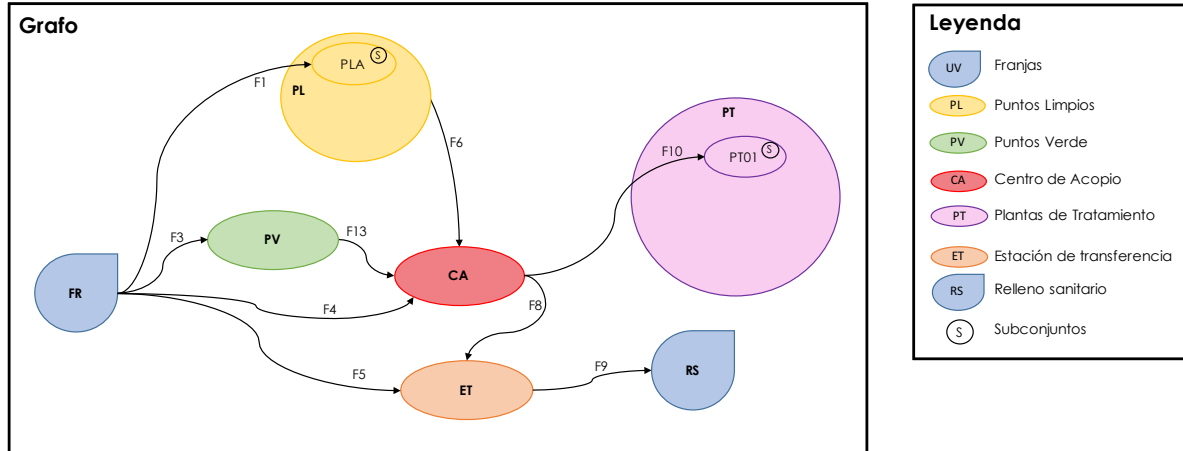


Figura 5.3: Esquema general del modelo actual o solución actual del sistema. (Elaboración propia)

Recopilando toda la información previa, es posible establecer relaciones entre los distintos conjuntos que aparecen en la Figura 5.3. El esquema se explica de la siguiente manera:

- Se debe comenzar por la entrada, la cual inicia en los puntos de generación de residuos. Para este caso, estos puntos corresponden a las *franjas*.
- Luego, desde la franja pueden ocurrir dos cosas, que las personas se dirijan de manera particular a algún punto verde (F3) y/o al punto limpio (F1) en la comuna para depositar material reciclado, o que existan retiros realizados por camiones, ya sean de recolección de basura o de material reciclable, hacia la estación de transferencia (F5) o al centro de acopio (F4), respectivamente.
- Si de una franja, una persona o una familia se dirige a un punto verde, puede ir a cualquiera de los 28 elementos pertenecientes al conjunto PV (puntos verde), los que ya fueron enumerados del PV1 hasta el PV28 en la Tabla 2.2.
- En el caso del transporte de plástico desde las franjas al centro de acopio (F4), se debe considerar que el camión de recolección de material reciclable se dirige a determinadas viviendas donde se recolecta todo lo que recicla una franja, y luego lo traslada al centro de acopio.
- A diferencia del camión anterior, el camión recolector debe realizar recorridos más largos debido a que debe recoger los residuos de cada una de las viviendas y/o villas de la

comuna para después depositarlo en la estación de transferencia puerta sur (ET0), para que finalmente, todo sea dispuesto en el Relleno Sanitario Santa Marta (RS0) (F9).

- f. El camión que recolecta material reciclable también es el que pasa por los distintos puntos verdes (F13) y el punto limpio (F6), retirando el material y llevándolo al centro de acopio (CA0).
- g. Finalmente, desde el centro de acopio ocurren dos cosas, si el material está sucio o no puede ser reciclado, es enviado a ET0 (F8). Por otro lado, en caso de que el material cumpla con las condiciones de reciclaje, sería enviado tratamiento que actualmente existe (F10).

A partir de la configuración planteada, se realiza el Balance de Masa que se presenta en la sección de Anexos B.2. De este se concluye que 228 toneladas se van a disposición final de las 230 toneladas de residuo plástico generado desde las franjas, y que casi 2 toneladas se van hacia el tratamiento mecánico.

### 5.3. Discusiones

Respecto a la división de la comuna en 12 franjas, permite un mejor manejo de futuros resultados, con el fin de distribuir los flujos y recorridos que deben transportar y realizar, respectivamente, los distintos vehículos del sistema. Trabajar con esta nueva división es práctico en comparación con las 67 villas que posee la comuna [13], ya que el tamaño de la superestructura a proponer con ellas generaría dificultades al momento de querer resolver el problema de optimización, debido a la gran cantidad de interacciones que se tendrían que contemplar.

A partir del esquema y del balance de masa, se concluye que sólo un 1 % del residuo plástico es reciclado en La Granja ¿qué ocurre en la configuración actual del sistema de gestión de residuos de la comuna para que se logre un porcentaje de recuperación de plásticos tan bajo en comparación con el flujo generado?

Es así como los siguientes capítulos se sostienen sobre la hipótesis de que la configuración actual del sistema de gestión de residuos es *subóptima*. De esta manera, estarán orientados a plantear un problema de optimización que permita proponer un mejor sistema de gestión.

# Capítulo 6

## Modelo gráfico de otras opciones de gestión de tratamiento

Ahora que ya se conoce el esquema general o grafo actual de la comuna, es posible agregar más elementos al problema, con el fin de responder la pregunta planteada en el capítulo anterior. En esta etapa se presentará la Superestructura del problema, que representará todas las posibles soluciones del problema planteado, como se presentó en el Capítulo 1. De esta manera se podrá cumplir con parte del objetivo específico planteado en la sección 1.3.2.

Antes de presentar el esquema o grafo de la superestructura, se propone agregar nuevos puntos limpios al sistema, ya que en comparación a otras comunas, La Granja sólo presenta uno [11].

### 6.1. Metodología

#### 6.1.1. Selección ubicación de nuevos puntos limpios

Para tener la superestructura completamente definida, falta determinar posibles ubicaciones para los nuevos puntos limpios que se desean instalar. Para ello se prosigue de la siguiente manera:

1. Primero se debe seleccionar una característica que permita determinar las ubicaciones de los nuevos puntos limpios, es decir, definir por qué se ubicarían estos puntos en determinados lugares.
2. Una vez que se determina el argumento, se seleccionan los sitios y se ubican en el mapa utilizando Google Maps y My Maps, ambas herramientas gratuitas de Google.

## 6.1.2. Modelo gráfico de Superestructura

Una vez que se tienen todos los datos de interés de la comuna, se selecciona el residuo de estudio, se conocen los tratamientos que se podrían aplicar, se definió la división de la comuna y se establecieron los posibles nuevos puntos limpios, se podrá confeccionar el grafo de la superestructura como se indica a continuación.

1. Se deben establecer todos los conjuntos y subconjuntos, tanto actuales como nuevos del sistema.
2. Luego, se establecen todas las conexiones que tengan sentido técnico, es decir, aquellas que podrían existir, pero dejando afuera aquellas que no tengan sentido técnico.

## 6.2. Resultados

### 6.2.1. Selección ubicación de nuevos puntos limpios

Para poder establecer posibles ubicaciones para los puntos limpios, es necesario considerar zonas en las que actualmente las personas se están dirigiendo a depositar residuos. Un ejemplo de ese tipo de lugares son los microbasurales ilegales que presenta la comuna. Actualmente, La Granja cuenta con 35 microbasurales, de los cuales destacan 12 como relevantes. La intersección de estos sitios se describen en la Tabla 6.1, y la distribución en el mapa se presentan en la Figura 6.1.

Los puntos del PL2 al PL13, corresponden entonces a los elementos que pertenecen al subconjunto PLN.

Tabla 6.1: Direcciones de algunos de los microbasurales de la comuna de La Granja

Código	Nº	Dirección
PL	2	Manco,Capac/ Cardenal Raúl Silva Henríquez
PL	3	Padre Esteban Gumucio/Pasaje 6
PL	4	Cardenal Raúl Silva H. con Porvenir
PL	5	San Gregorio/2 Oriente
PL	6	San Gregorio/Lontue/El Tabo
PL	7	El Tabo/Av. Sur
PL	8	Santo Tomás/ Sofia Hunneus
PL	9	Bandejón San José de la Estrella
PL	10	Santa Rosa/ Quintero
PL	11	Victoria/Adasme
PL	12	Costado Parque Brasil (Coronel y Mañío)
PL	13	Cardenal Raúl Silva H. Con Tome

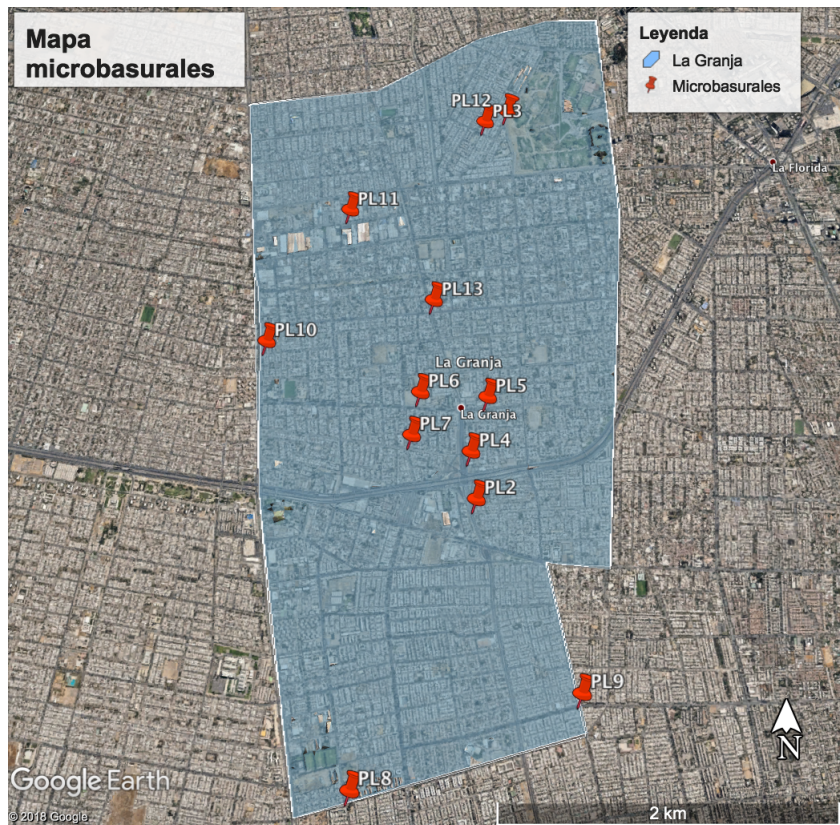


Figura 6.1: Mapa con las ubicaciones de algunos de los microbasurales.

### 6.2.2. Representación gráfica de la Superestructura

Recopilando toda la información previa, es posible establecer relaciones entre los distintos puntos mencionados, las cuales se presentan en la Figura 6.2. La estructura se explica de la misma manera que la Figura 5.3, haciendo la salvedad de algunos flujos que no fueron mencionados:

- a. Ahora, además de existir F1 desde las franjas (FR) hacia el punto limpio existente (PL1 perteneciente al subconjunto PLA), ahora también existirán posibles flujos F2 desde las franjas a los puntos limpios nuevos pertenecientes al subconjunto PLN.
- b. En cuanto al flujo F10 que existe desde el Centro de Acopio (CA) hacia PT01, ahora también se considerarán dos nuevos flujos F11 y F12, el primero se dirigirá a PT02 que corresponde a la planta de pirólisis y el segundo a PT03 que corresponde a la planta de combustión.

La descripción de todos los flujos presentados en la Figura 6.2 se explicitan en la Tabla 6.2. Desde este punto en adelante, se hará referencia a los distintos flujos por su forma abreviada.

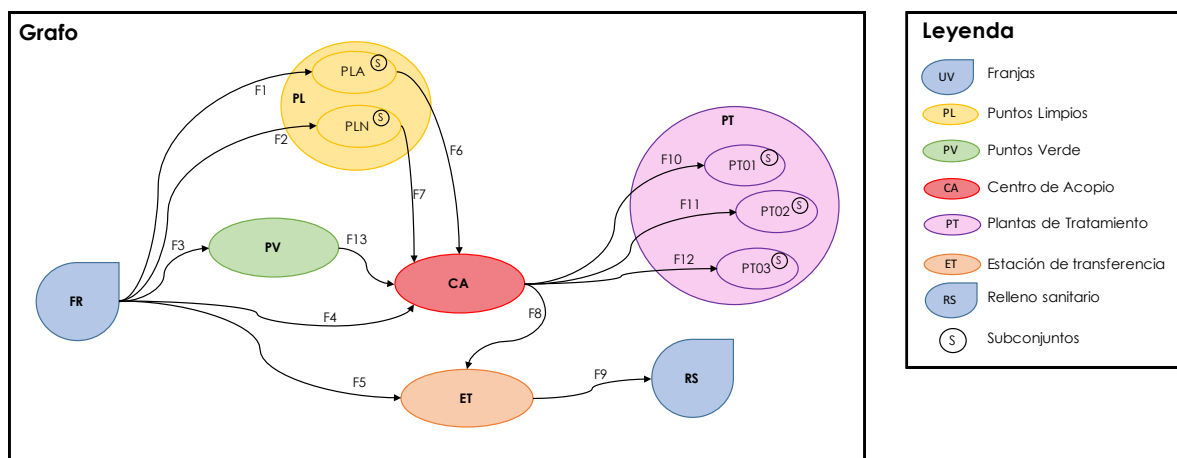


Figura 6.2: Esquema general de la superestructura. (Elaboración propia)

Tabla 6.2: Descripción de los flujos del sistema. (Elaboración propia)

Flujos	Descripción
F1(FR,PLA)	Flujos que van desde las franjas hacia el punto limpio antiguo.
F2(FR,PLN)	Flujos que van desde las franjas hacia los puntos limpio nuevos.
F3(FR,PV)	Flujos que van desde las franjas hacia los puntos verdes.
F4(FR,CA)	Flujos que van desde las franjas hacia el centro de acopio.
F5(FR,ET)	Flujos que van desde las franjas hacia la estación de transferencia.
F6(PLA,CA)	Flujos que van desde el punto limpio antiguo hacia el centro de acopio.
F7(PLN,CA)	Flujos que van desde los puntos limpio nuevos hacia el centro de acopio.
F8(CA,ET)	Flujo que va desde el centro de acopio hacia la estación de transferencia.
F9(ET,RS)	Flujo de estación de transferencia al relleno sanitario.
F10(CA,P1)	Flujo del centro de acopio a la planta de tratamiento mecánico.
F11(CA,P2)	Flujo del centro de acopio a la planta de pirólisis.
F12(CA,P3)	Flujo del centro de acopio a la planta de combustión.
F13(PV,CA)	Flujos que van desde los puntos verde al centro de acopio.

De acuerdo a lo que ya se explicó en los antecedentes del trabajo, la superestructura corresponde al conjunto de soluciones factibles del problema a optimizar. En la Figura 6.3 se presenta un esquema más específico que el previamente presentado. En este caso, si se considera que existen  $n$  franjas (FR), cada una de ellas puede presentar un flujo de plásticos que pueda dirigirse a cada uno de los  $m$  puntos verdes (PV). La descripción es análoga para los flujos F1(FR,PLA), F2(FR,PLN), F4(FR,CA) y F5(FR,ET).

Luego, se tiene que cada una de las  $n$  franjas pertenecientes a FR, cada uno de los  $m$  puntos verdes pertenecientes a PV, y cada uno de los  $p$  puntos limpios pertenecientes a PL, podrían contar con flujos que se dirijan al Centro de Acopio (CA).

Finalmente, podría existir un flujo que se dirija a ET, y/o flujos que se dirijan a las plantas de tratamiento existentes o nuevas.

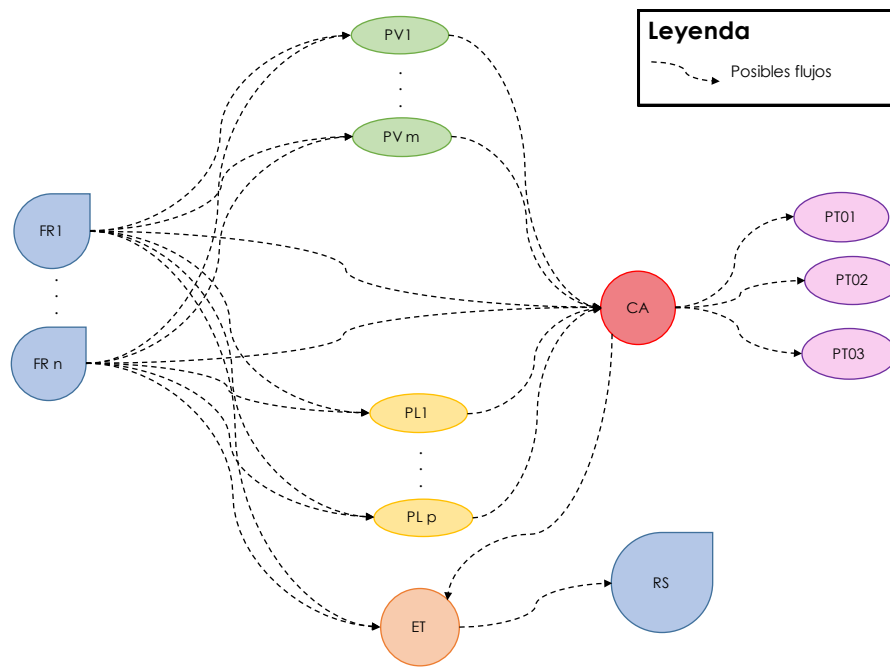


Figura 6.3: Esquema explicativo de todas las soluciones posibles del problema. (Elaboración propia)

### 6.3. Discusiones

La superestructura definida en este capítulo actualmente contiene sólo localizaciones, ya sean puntos específicos, zonas como las franjas o tratamientos a los que se enviarán flujos de residuo plástico, ¿es esta la representación más compleja del problema? La respuesta es: probablemente no.

El sistema podría incluir muchos otros puntos, como más puntos verdes, puntos limpios o centros de acopio; una división mayor a 12 franjas; todos los rellenos sanitarios existentes en la región o país; entre otros. Por otro lado, también podría incluir otras decisiones, como en qué vehículos se trasladarán cada uno de los flujos de residuo plástico, o qué ruta tomaría cada uno de los vehículos, o a qué lugar de tratamiento específico se llevarán los residuos, o si los tratamientos propuestos se instalarían o no en posibles lugares de la región.

Si bien esta no es la representación más compleja del problema, la superestructura propuesta ha permitido notar la falta de datos para poder configurarla, desde la caracterización de los residuos a los costos de ciertas operaciones que se llevan a cabo en el problema. Para poder tener mejores resultados en el futuro sería de mucha utilidad contar con mediciones de los distintos residuos que se generan en la comuna y de cuántos de ellos están siendo reciclados.

# Capítulo 7

## Formulación del problema de optimización

Como se presentó en el Capítulo 6, ya se cuenta con el esquema general de todas las posibles soluciones del problema. Para poder encontrar alguna configuración óptima, es necesario formular el problema.

A continuación se presentarán los pasos a seguir para establecer la formulación del problema, y posteriormente se presentarán todos los elementos que lo componen. De esta manera se logra avanzar con parte de los objetivos específicos propuestos en la sección 1.3.2.

### 7.1. Metodología

La formulación del problema puede involucrar muchos pasos, dependiendo de las características del mismo. Sin embargo, los pasos para formular se pueden definir de manera breve, como se presenta a continuación y en la Figura 7.1.

1. Definir los conjuntos, sub-conjuntos y los elementos que participan en el problema de optimización.
2. Como todo problema, también se requiere expresar los parámetros necesarios. Además de estos, es necesario definir las variables de decisión y su naturaleza, es decir, si son positivas, negativas, binarias o de otro tipo.
3. Luego, es importante establecer las restricciones que acompañan al problema, por ejemplo, de tipo lógicas, del balance de masa, entre otras.
4. Finalmente, una vez que se tiene todo lo anterior, se definen la o las funciones objetivo del problema.

En la Figura 7.1 se presenta un esquema resumen del trabajo a realizar en esta sección.





Figura 7.1: Esquema de trabajo para realizar la formulación del problema.

## 7.2. Resultados

### 7.2.1. Funciones objetivo

#### Indicador económico

Para poder resolver el problema de optimización primero hay que formularlo, en el caso del indicador económico mencionado en el Capítulo 1, estará orientado a minimizar los principales costos que componen el sistema, a saber:

1. Costos de transporte: estos se deben analizar para tres tipos de transporte, que corresponden a los camiones de recolección y transporte de residuos, a camiones recolectores de material reciclado y al transporte por vehículo particular. El valor final de estos costos, depende de la cantidad de plástico que sea transportado, es decir, estos costos corresponden a costos variables.
2. Costos de operación: que se vinculan a la operación del centro de acopio, a las plantas de tratamiento mecánico y a las plantas de tratamiento propuestas. Estos dependen de la cantidad de plástico que deban tratar, por lo tanto, corresponden a costos variables.
3. Costos de instalación: estos están vinculados al costo económico de instalar nuevos puntos limpios y/o nuevas plantas de tratamiento, y corresponden a costos fijos.
4. Costos de disposición final: básicamente, costo variable relacionados con el costo de disponer una tonelada en el relleno sanitario.

#### Función objetivo medioambiental

Esta función contará con un único indicador, correspondiente a la jerarquización expuesta en la Ley REP [6]. De esta manera, se buscará otorgar un puntaje asociado al tipo de tratamiento de acuerdo a la jerarquización del manejo de residuos, siendo los tratamientos más recomendados los que tendrán el menor puntaje, y la disposición final de residuos, el mayor puntaje.

## 7.2.2. Conjuntos

A continuación se presentarán de manera algebraica los distintos conjuntos y subconjuntos del problema a optimizar.

- $FR = (1, \dots, n)$  es el conjunto de las franjas de la comuna (propuestas en el Capítulo 5.
- $PL = (1, \dots, p)$  es el conjunto de los puntos limpios del problema, tanto el que existe actualmente como los propuestos en el Capítulo 6.
- $PLA \subset PL$  es el conjunto de los puntos limpios ya existentes, en este caso sólo existe uno como se presentó en el Capítulo 2.
- $PLN \subset PL$  es el conjunto de los puntos limpios nuevos propuestos en el Capítulo 6.
- $PV = (1, \dots, m)$  es el conjunto de los puntos verdes existentes en la comuna, los que fueron presentados en el Capítulo 2.
- $CA = (CA0)$  es el conjunto del Centro de Acopio, este conjunto sólo posee un elemento, el que fue presentado en el Capítulo 2.
- $ET = (ET0)$  es el conjunto de Estación de Transferencia, que al igual que el conjunto anterior, sólo cuenta con un elemento y fue presentado en el Capítulo 2.
- $RS = (RS0)$  es el conjunto de Relleno Sanitario, que también cuenta con un único elemento, presentado en el Capítulo 2.
- $PT = (PT01, PT02, PT03)$  es el conjunto de tratamientos seleccionados para el reciclaje del residuo plástico, los que se presentaron en el Capítulo 4.
- $P1 \subset PT$  es el conjunto de plantas de tratamiento mecánico, que para efectos de este problema sólo contará con un elemento.
- $P2 \subset PT$  es el conjunto de plantas de tratamiento de pirólisis, que también contará con un único elemento.
- $P3 \subset PT$  es el conjunto de plantas de tratamiento de combustión, que también contará con un único elemento.

Los conjuntos del problema de optimización son los mencionados, que ya habían sido presentados en el esquema de la Figura 6.2. Se expresan de manera explícita junto con sus respectivos nodos en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Conjuntos y subconjuntos del problema de optimización y sus respectivos elementos. (Elaboración propia)

Conjunto	Nombre	Subconjunto	Nombre	Elementos
FR	Franjas	No aplica	No aplica	FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FR8, FR9, FR10, FR11, FR12
PL	Puntos Limpios	PLA	Punto Limpio Antiguo	PL1
		PLN	Puntos Limpios Nuevos	PL2, PL3, PL4, PL5, PL6, PL7, PL8, PL9, PL10, PL11, PL12, PL13
PV	Puntos Verdes	No aplica	No aplica	PV1, PV2, PV3, PV4, PV5, PV6, PV7, PV8, PV9, PV10, PV11, PV12, PV13, PV14, PV15, PV16, PV17, PV18, PV19, PV20, PV21, PV22, PV23, PV24, PV25, PV26, PV27, PV28
CA	Centro de Acopio	No aplica	No aplica	CA0
ET	Estación de Transferencia	No aplica	No aplica	ET0
RS	Relleno Sanitario	No aplica	No aplica	RS0
PT	Plantas de Tratamiento	P1	Tratamiento mecánico	PT01
		P2	Pirólisis	PT02
		P3	Combustión	PT03

En las siguientes secciones se presentarán todos los parámetros a utilizar en la formulación, específicamente, los costos de operación por tonelada, los costos de inversión por instalación, los costos de transporte por tonelada, los puntajes asignados a cada tratamiento, las condiciones iniciales del sistema y las distancias entre los distintos elementos (sólo entre los técnicamente factibles de conectar).

### 7.2.3. Parámetros: Costos de operación

En la Tabla 7.2 se presentan los costos de operación del centro de acopio, de la planta de tratamiento mecánico, de pirólisis y combustión, además del costo de disponer una tonelada en el relleno sanitario Santa Marta. Para mayor detalle de los cálculos realizados, revisar el apartado de Anexo C.1.

Tabla 7.2: Costos de disposición final y de operación del centro de acopio y plantas de tratamientos.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CDF	Costo disposición final	12.500,000	\$CLP/t	[37]
COCA	Costo operación Centro de Acopio	5.900,000	\$CLP/t	Municipalidad de La Granja
COPT1	Costo operación PT01	21.001,704	\$CLP/t	[32]
COPT2	Costo operación PT02	35.458,440	\$CLP/t	[32]
COPT3	Costo operación PT03	9.390,506	\$CLP/t	[35]

## 7.2.4. Parámetros: Costos de inversión

En el caso de los costos de inversión, hay que tener en cuenta que el problema se delimita a la comuna de La Granja, sin embargo, en el país las distintas empresas de reciclaje de plástico que existen reciben flujos desde distintas comunas.

Si se considera instalar una planta completa o de la capacidad encontrada por bibliografía, los costos de inversión serían elevados para la comuna, pero quizá no lo serían para la Región Metropolitana. Para mantener los rangos de la inversión dentro de la localidad del problema se supondrán dos casos, uno en que las instalaciones sean capaces de recibir todo el flujo másico de la comuna y otro caso en que sean capaces de recibir una fracción del flujo. Ambas situaciones se indican a continuación:

1. Caso 1: Que la capacidad de las plantas de tratamiento propuestas tengan como máximo una capacidad de 300 toneladas cada una.
2. Caso 2: Que la capacidad de las plantas sea sólo de 100 toneladas cada una.

Es importante reiterar que se está considerando la inversión de una parte de las plantas propuestas, y que la capacidad real de las plantas puede ser mayor, ver Anexos C.2. Sólo para mantener los costos de instalación a escala de la comuna se ha propuesto trabajar con las capacidades propuestas, asumiendo que podrían ser capaces de recibir un flujo de 100 o 300 toneladas mensuales correspondientes a la comuna de La Granja, además de poder recibir otros flujos desde otras comunas.

Si bien se presentan 2 casos, existen algunos parámetros que no variarán según la capacidad de cada planta. Los valores de dichos datos se presentan en la Tabla 7.3. Para una explicación detallada de la obtención de estos valores, revisar la sección de Anexos C.2.

Tabla 7.3: Parámetros genéricos para los costos de instalación. (Elaboración propia)

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CIPL(PLN)	Costo instalación punto limpio	139.081.394	\$CLP	[38]
K1	Factor utilizado para anualizar costo instalación PL	0,0108	1/mes	[39]
K2	Factor utilizado para anualizar costo instalación P2	0,0067	1/mes	[39]
K3	Factor utilizado para anualizar costo instalación P3	0,0108	1/mes	[39]

Tabla 7.4: Valores de las capacidades invariables de los puntos limpios, centro de acopio, estación de transferencia y relleno sanitario.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CAP1(PLA)	Capacidad punto limpio antiguo	0,088	t/mes	Municipalidad de La Granja
CAP2(PLN)	Capacidad de los puntos limpio nuevos	0,088	t/mes	Municipalidad de La Granja
CAP3(CA)	Capacidad de centro de acopio	286,000	t/mes	Municipalidad de La Granja
CAP8(ET)	Capacidad de estación de transferencia	108.333,333	t/mes	[40]
CAP9(RS)	Capacidad de relleno sanitario	108.333,333	t/mes	[40]
CAP10(PV)	Capacidad de puntos verdes	0,044	t/mes	Municipalidad de La Granja

Además de los parámetros presentados en la Tabla 7.3, las capacidades que se muestran

en la Tabla 7.4 también son fijas e independientes de las capacidades de las instalaciones de las plantas de tratamiento. Es importante dejar en conocimiento las capacidades de las distintas instalaciones para establecer restricciones y tomar decisiones de existencia.

A partir de estimaciones presentadas en el Anexos C.2, se obtienen los costos de instalación para las plantas de tratamiento en los distintos casos propuestos, los que se presentan en la Tabla 7.5. En la Tabla 7.6 se reiteran las capacidades de las plantas de tratamiento en los distintos casos planteados.

Tabla 7.5: Costos de inversión considerando el caso 1 y 2 respecto a las capacidades de las plantas de tratamiento propuestas.

Caso	Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
1	CIPT2(P2)	Costo instalación P2	3.706.701.038.728	\$CLP
	CIPT3(P3)	Costo instalación P3	7.059.523.206	\$CLP
2	CIPT2(P2)	Costo instalación P2	1.917.409.200.259	\$CLP
	CIPT3(P3)	Costo instalación P3	3.651.763.280	\$CLP

Tabla 7.6: Capacidades de las plantas de tratamiento según los dos casos propuestos.

Caso	Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
1	CAP4(P1)	Capacidad de P1	300	t/mes
	CAP5(P2)	Capacidad de P2	300	t/mes
	CAP6(P3)	Capacidad de P3	300	t/mes
2	CAP4(P1)	Capacidad de P1	100	t/mes
	CAP5(P2)	Capacidad de P2	100	t/mes
	CAP6(P3)	Capacidad de P3	100	t/mes

Para el caso de la planta de tratamiento mecánico no se analizan los costos de instalación, ya que este tipo de plantas ya existen en Chile, las otras plantas no están presentes en el país.

### 7.2.5. Parámetros: Costos de Transporte

Los costos de transporte dependerán del tipo de vehículo y también de la capacidad del mismo. Dichos parámetros y sus respectivos valores se presentan en la Tabla 7.7. Los cálculos realizados para obtener los valores presentados se encuentran en la sección de Anexos C.3.

Tabla 7.7: Parámetros utilizados para calcular el costo de transporte total.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
CT	Costo transporte de camiones recolectores.	1.048,00	\$CLP/km
CTT	Costo transporte de camiones de reciclaje de materiales.	666,00	\$CLP/km
CV	Costo transporte de vehículos particulares.	52,00	\$CLP/km
CAP(CT)	Capacidad camión recolector.	7,60	t
CAP(CTT)	Capacidad camión de reciclaje.	5,00	t
CAP(CV)	Capacidad promedio vehículos particulares.	0,007	t

## 7.2.6. Parámetros: Valores del indicador ambiental para diferentes tratamientos

Para el caso del indicador medioambiental, es necesario designar los puntajes que se otorgarán a cada uno de los tratamientos y la disposición final.

Para esto se proponen dos escenarios, en ambos respetando la jerarquización indicada en la Ley REP [6]:

- En el primero, se asignan puntajes de tal manera que la diferencia entre cada uno de los tratamientos es la misma.
- En el segundo, luego de realizar iteraciones y distintos análisis de puntaje, se determina utilizar una distribución del puntaje obtenida a partir de una función polinómica de grado 3. Esta selección se establece dado que se busca obtener una relación o distribución de puntajes más alejada entre los tratamientos que se proponen y la disposición final, con el fin de forzar la elección de los tratamientos por sobre el envío de los residuos al relleno sanitario.

Los valores de los puntajes asignados se presentan en la Tabla 7.8, los cálculos y el procedimiento realizado para obtener los valores se presenta en la sección Anexos C.4.

Tabla 7.8: Puntajes asignados para cada tipo de manejo del residuo plástico en los dos escenarios propuestos.

Escenario	Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
1	S1(P1)	Puntaje para tratamiento mecánico (P1)	0,25	[-]
	S2(P2)	Puntaje para tratamiento de pirólisis (P2)	0,50	[-]
	S3(P3)	Puntaje para tratamiento de combustión (P3)	0,75	[-]
	S4(RS)	Puntaje para el relleno sanitario (RS)	1,00	[-]
2	S1(P1)	Puntaje para tratamiento mecánico (P1)	0,10	[-]
	S2(P2)	Puntaje para tratamiento de pirólisis (P2)	0,17	[-]
	S3(P3)	Puntaje para tratamiento de combustión (P3)	0,26	[-]
	S4(RS)	Puntaje para el relleno sanitario (RS)	1,00	[-]

## 7.2.7. Parámetros: Flujos iniciales

En la sección de balances de masa del modelo actual, Anexos B.2, se realizó el cálculo del flujo másico producido por cada una de las franjas. Dichos valores son los que se utilizarán como condición inicial para el problema de optimización y son los que se presentan en la Tabla 7.9.

Tabla 7.9: Flujo másico generado por cada franja. (Elaboración propia)

<b>E0(FR)</b>	<b>Generación por franja [t/mes]</b>
FR1	27,39
FR2	27,57
FR3	22,26
FR4	22,09
FR5	23,00
FR6	22,91
FR7	17,08
FR8	16,97
FR9	10,58
FR10	10,75
FR11	14,75
FR12	14,68

### 7.2.8. Parámetros: Distancias

Otros parámetros relevantes para el problema, son las distancias entre: las franjas y los puntos verdes, puntos limpios, centro de acopio y Estación de Transferencia; los puntos verdes, los puntos limpios y el centro de acopio; el centro de acopio y la estación de transferencia; y la Estación de Transferencia y el Relleno Sanitario.

A continuación se presentan las distancias medidas utilizando las herramientas Google Earth y My Maps de Google.

#### Distancia punto limpio antiguo al centro de acopio

En primer lugar, se tiene la distancia de PLA al centro de acopio como se presenta en la Tabla 7.10, considerando la distancia que debería recorrer el camión de recolección de residuos reciclables.

Tabla 7.10: Distancia punto limpio antiguo al centro de acopio.

<b>D1(PLA,CA)</b>	<b>CA0</b>	<b>Unidad</b>
<b>PL1</b>	8	km

#### Distancia puntos limpio nuevos al centro de acopio

Al igual que el caso anterior, se mide la distancia entre los elementos del conjunto PLN y el centro de acopio (CA), medidas que aparecen en la Tabla 7.11.

Tabla 7.11: Distancia puntos limpio nuevos al centro de acopio.

<b>D2(PLN,CA)</b>	<b>CA0</b>	<b>Unidad</b>
<b>PL2</b>	8	km
<b>PL3</b>	2	km
<b>PL4</b>	8	km
<b>PL5</b>	6	km
<b>PL6</b>	8	km
<b>PL7</b>	8	km
<b>PL8</b>	14	km
<b>PL9</b>	10	km
<b>PL10</b>	8	km
<b>PL11</b>	4	km
<b>PL12</b>	1.86	km
<b>PL13</b>	6	km

### Distancia de franjas a estación de transferencia

A diferencia de los casos anteriores, la distancias que se deben recorrer entre los elementos de FR a ET, corresponden a recorridos a realizar por los camiones recolectores de residuos. Los datos de las distancias de este punto se presentan en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12: Distancia de franjas a estación de transferencia.

<b>D3(FR,ET)</b>	<b>ET0</b>	<b>Unidad</b>
<b>FR1</b>	65	km
<b>FR2</b>	58	km
<b>FR3</b>	50	km
<b>FR4</b>	56	km
<b>FR5</b>	50	km
<b>FR6</b>	56	km
<b>FR7</b>	50	km
<b>FR8</b>	50	km
<b>FR9</b>	38	km
<b>FR10</b>	46	km
<b>FR11</b>	42	km
<b>FR12</b>	48	km

### Distancia de franjas a centro de acopio

Según como funciona actualmente la comuna, existen villas en las que en una vivienda se acumulan los materiales reciclables de dicha villa. De esta manera existen puntos específicos por los que el camión de recolección de material reciclable debe transitar en cada franja, trazando una ruta determinada en cada una de ellas. Las distancias aproximadas a recorrer entre FR y CA, considerando la ruta que inicia en el centro de acopio, recorre la franja y retorna a CA, se presentan en la Tabla 7.13.



Tabla 7.13: Distancias de franjas a centro de acopio

D4(FR,CA)	CA0	Unidad
FR1	49	km
FR2	29	km
FR3	36	km
FR4	34	km
FR5	42	km
FR6	40	km
FR7	42	km
FR8	38	km
FR9	38	km
FR10	40	km
FR11	40	km
FR12	46	km

### Distancia entre puntos verdes y centro de acopio

Otros recorridos que podrían realizarse son aquellos entre los elementos de PV y el centro de acopio (CA), que le competen a los camiones de recolección de material reciclable. Los valores de las distancias se expresan en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14: Distancia entre puntos verdes y centro de acopio

D5(PV,CA)	CA0	Unidad	D5(PV,CA)	CA0	Unidad
PV1	12	km	PV15	2	km
PV2	2	km	PV16	4	km
PV3	4	km	PV17	8	km
PV4	4	km	PV18	4	km
PV5	4	km	PV19	6	km
PV6	6	km	PV20	12	km
PV7	6	km	PV21	12	km
PV8	4	km	PV22	10	km
PV9	6	km	PV23	8	km
PV10	2	km	PV24	6	km
PV11	4	km	PV25	12	km
PV12	6	km	PV26	12	km
PV13	4	km	PV27	4	km
PV14	4	km	PV28	4	km

### Distancia entre centro de acopio y estación de transferencia

Otra distancia a considerar, es de CA a ET, recordando que existe un flujo desde CA que se descarta y se envía a disposición final. El valor se presenta en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15: Distancia entre centro de acopio y estación de transferencia.

D6(CA,ET)	ET0	Unidad
CA0	32	km

## Distancia entre estación de transferencia y relleno sanitario

La distancia entre la estación de transferencia (ET) y el relleno sanitario (RS), es parte del recorrido que realizan los camiones de recolección y transporte de residuos, y su valor se presenta en la Tabla 7.16.

Tabla 7.16: Distancia entre estación de transferencia y relleno sanitario.

D7(CA,ET)	RS0	Unidad
ET0	62	km

## Distancia entre franjas y puntos verdes

Entre las distancias que pueden ser transitadas por vehículos particulares, se encuentran aquellas entre las franjas (FR) y los puntos verdes (PV). Todas las combinaciones posibles entre ambos conjuntos se presentan en las Tablas 7.17 y 7.18.

Tabla 7.17: Distancia entre franjas y puntos verdes. De PV1 a PV14.

D8(FR,PV)	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7	PV8	PV9	PV10	PV11	PV12	PV13	PV14	Unidad
FR1	8,00	4,00	4,00	4,00	2,00	4,00	2,00	1,26	4,00	4,00	4,00	4,00	0,88	4,00	km
FR2	10,00	2,00	2,00	1,96	1,60	6,00	4,00	4,00	4,00	0,79	2,00	4,00	4,00	4,00	km
FR3	8,00	4,00	1,95	2,00	2,00	4,00	2,00	2,00	0,95	4,00	2,00	2,00	4,00	1,65	km
FR4	10,00	4,00	1,44	1,36	1,98	4,00	4,00	4,00	4,00	1,88	0,54	4,00	4,00	1,55	km
FR5	6,00	6,00	4,00	4,00	4,00	1,59	4,00	4,00	1,97	6,00	6,00	0,81	6,00	4,00	km
FR6	6,00	6,00	2,00	4,00	4,00	1,35	4,00	4,00	4,00	4,00	2,00	2,00	6,00	4,00	km
FR7	6,00	8,00	6,00	6,00	8,00	4,00	8,00	8,00	6,00	10,00	8,00	4,00	8,00	6,00	km
FR8	6,00	6,00	4,00	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	6,00	6,00	4,00	4,00	8,00	4,00	km
FR9	0,97	10,00	6,00	8,00	8,00	4,00	8,00	8,00	6,00	10,00	8,00	6,00	8,00	8,00	km
FR10	2,00	8,00	4,00	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	6,00	8,00	6,00	4,00	8,00	6,00	km
FR11	1,54	12,00	8,00	10,00	10,00	6,00	10,00	10,00	8,00	10,00	10,00	8,00	10,00	8,00	km
FR12	2,00	10,00	6,00	8,00	8,00	4,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	6,00	8,00	6,00	km

Tabla 7.18: Distancia entre franjas y puntos verdes. De PV15 a PV28.

D8(FR,PV)	PV15	PV16	PV17	PV18	PV19	PV20	PV21	PV22	PV23	PV24	PV25	PV26	PV27	PV28	Unidad
FR1	8,00	1,19	8,00	4,00	4,00	8,00	10,00	8,00	4,00	4,00	8,00	8,00	4,00	4,00	km
FR2	6,00	4,00	6,00	4,00	6,00	10,00	10,00	8,00	6,00	6,00	12,00	10,00	2,00	4,00	km
FR3	10,00	4,00	6,00	1,92	2,00	6,00	8,00	6,00	1,97	1,94	8,00	8,00	1,99	1,77	km
FR4	8,00	4,00	4,00	1,48	4,00	8,00	8,00	6,00	4,00	4,00	10,00	8,00	1,48	2,00	km
FR5	12,00	6,00	4,00	4,00	1,14	4,00	6,00	4,00	1,98	4,00	6,00	6,00	4,00	2,00	km
FR6	10,00	6,00	2,00	2,00	1,63	6,00	6,00	4,00	4,00	6,00	8,00	6,00	2,00	2,00	km
FR7	16,00	8,00	4,00	6,00	4,00	4,00	6,00	4,00	8,00	8,00	6,00	4,00	6,00	6,00	km
FR8	12,00	6,00	0,91	4,00	2,00	4,00	4,00	2,00	6,00	6,00	6,00	4,00	4,00	4,00	km
FR9	20,00	8,00	4,00	6,00	6,00	0,74	1,10	2,00	4,00	6,00	1,29	1,85	6,00	6,00	km
FR10	14,00	8,00	1,45	4,00	4,00	2,00	1,86	0,65	6,00	8,00	4,00	2,00	4,00	4,00	km
FR11	20,00	10,00	4,00	8,00	6,00	2,00	1,67	4,00	6,00	8,00	1,86	4,00	8,00	8,00	km
FR12	14,00	8,00	2,00	6,00	4,00	4,00	1,95	1,31	8,00	8,00	4,00	4,00	6,00	6,00	km

## Distancia entre franjas y punto limpio antiguo

Otras distancias que pueden ser recorridas por un vehículo particular, son aquellas entre las franjas (FR) y los puntos limpios (PL), en particular en este caso, se presenta la distancia de FR a PL1, valor que se muestra en la Tabla 7.19.

Tabla 7.19: Distancia entre franjas y punto limpio antiguo.

D9(FR,PLA)	PL1	Unidad
FR1	8,00	km
FR2	6,00	km
FR3	6,00	km
FR4	4,00	km
FR5	4,00	km
FR6	1,73	km
FR7	6,00	km
FR8	2,00	km
FR9	6,00	km
FR10	4,00	km
FR11	8,00	km
FR12	6,00	km

## Distancia entre franjas y puntos limpios nuevos

Las distancias entre las franjas y los puntos limpios nuevos propuestos (PLN), se presentan aquí, en la Tabla 7.20.

Tabla 7.20: Distancia entre franjas y puntos limpios nuevos.

D10(FR,PLN)	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	PL8	PL9	PL10	PL11	PL12	PL13	Unidad
FR1	6,00	2,00	8,00	6,00	6,00	6,00	10,00	10,00	6,00	1,61	4,00	4,00	km
FR2	6,00	0,85	6,00	4,00	6,00	6,00	12,00	8,00	8,00	4,00	0,39	4,00	km
FR3	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	4,00	10,00	8,00	4,00	2,00	4,00	2,00	km
FR4	4,00	2,00	4,00	4,00	4,00	4,00	10,00	8,00	6,00	2,00	1,95	2,00	km
FR5	2,00	6,00	4,00	2,00	1,61	1,58	8,00	6,00	2,00	4,00	6,00	1,74	km
FR6	2,00	4,00	2,00	0,98	1,80	4,00	8,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,00	km
FR7	2,00	10,00	2,00	4,00	4,00	4,00	8,00	6,00	6,00	6,00	10,00	4,00	km
FR8	0,71	6,00	1,31	2,00	2,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00	6,00	4,00	km
FR9	4,00	10,00	4,00	4,00	6,00	4,00	2,00	4,00	4,00	6,00	10,00	6,00	km
FR10	1,19	6,00	1,79	2,00	4,00	4,00	4,00	2,00	6,00	6,00	8,00	4,00	km
FR11	4,00	10,00	6,00	6,00	6,00	6,00	0,75	4,00	6,00	8,00	10,00	8,00	km
FR12	2,00	8,00	2,00	4,00	4,00	4,00	2,00	1,68	6,00	8,00	8,00	4,00	km

## 7.2.9. Variables

Una parte importante de la formulación del problema es establecer las variables del mismo. En este caso, corresponden a los flujos entre los nodos de gestión de residuos y a las variables de existencia de ciertos puntos de tratamiento, como los puntos limpios y las plantas de tratamiento propuestas.

La descripción e información de cada una de las variables se presenta a continuación.

### Variables de flujo

- $F1_{np_1} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la franja  $n \in FR$  y el punto limpio antiguo  $p_1 \in PLA$ .

- $F2_{np} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la franja  $n \in FR$  y los puntos limpio nuevos  $p \in PLN$ .
- $F3_{nm} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la franja  $n \in FR$  y los puntos verdes  $m \in PV$ .
- $F4_{ni} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la franja  $n \in FR$  y el centro de acopio  $i \in CA$ .
- $F5_{nv} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la franja  $n \in FR$  y la estación de transferencia  $v \in ET$ .
- $F6_{p_1i} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre el punto limpio antiguo  $p_1 \in PLA$  y el centro de acopio  $i \in CA$ .
- $F7_{pi} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre los puntos limpio nuevos  $p \in PLN$  y el centro de acopio  $i \in CA$ .
- $F8_{iv} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre el centro de acopio  $i \in CA$  y la estación de transferencia  $v \in ET$ .
- $F9_{vw} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre la estación de transferencia  $v \in ET$  y el relleno sanitario  $w \in RS$ .
- $F10_{ir} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre el centro de acopio  $i \in CA$  y la planta de tratamiento mecánico  $r \in P1$ .
- $F11_{is} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre el centro de acopio  $i \in CA$  y la planta de pirólisis  $s \in P2$ .
- $F12_{it} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre el centro de acopio  $i \in CA$  y la planta de combustión  $t \in P3$ .
- $F13_{mi} \in \mathbb{R}^+$  es el flujo másico entre los puntos verdes  $m \in PV$  y el centro de acopio  $i \in CA$ .

### Variables de existencia

- $A_p \in \mathbb{Z}$ ,  $A_p = 1$  si el punto limpio  $p \in PLN$  se instala.  $A_p = 0$  de otra manera.
- $B_s \in \mathbb{Z}$ ,  $B_s = 1$  si la planta de pirólisis  $s \in P2$  se instala.  $B_s = 0$  de otra manera.
- $C_t \in \mathbb{Z}$ ,  $C_t = 1$  si la planta de combustión  $t \in P3$  se instala.  $C_t = 0$  de otra manera.

### 7.2.10. Restricciones matemáticas

Para que el modelo sepa como distribuir los residuos plásticos en los distintos puntos de acopio y tratamiento, es importante establecer las restricciones del problema. A continuación se detallan todas las restricciones que se utilizarán para resolver el sistema planteado.

### Balance de Masa Global

La primera restricción corresponde al balance de masa global, es decir, que toda la masa que entra al sistema sea igual a la que sale del mismo. La expresión matemática se define en la ecuación 7.1.

$$\sum_{n \in FR} F1_{np_1} + \sum_{n \in FR} \sum_{p \in PLN} F2_{np} + \sum_{n \in FR} \sum_{m \in PV} F3_{nm} + \sum_{n \in FR} F4_{ni} + \sum_{n \in FR} F5_{nv} = F10_{ir} + F11_{is} + F12_{it} + F9_{vw} \quad (7.1)$$

$\forall p_1 \in PLA, i \in CA, r \in P1, s \in P2, t \in P3, v \in ET, w \in RS$

### Balance de masa en cada punto de gestión de residuos

En conjunto con el balance de masa global, se debe cumplir el balance de masa en cada nodo de conexión del sistema. A continuación se presentan las distintas relaciones de balance de masa, correspondientes a cada clase de puntos de gestión del sistema.

En la ecuación 7.2 se expresa el balance de masa en el punto limpio existente (PLA), lugar al que pueden llegar flujos desde distintas franjas y sale un flujo que se dirige al centro de acopio.

$$\sum_{n \in FR} F1_{np_1} = F6_{p_1i} \quad \forall p_1 \in PLA, i \in CA \quad (7.2)$$

En la ecuación 7.3 se realiza el balance de masa sobre cada uno de los puntos limpios nuevos (PLN).

$$\sum_{n \in FR} F2_{np} = F7_{pi} \quad \forall p \in PLN, i \in CA \quad (7.3)$$

En la ecuación 7.4 se realiza el balance de masa sobre el centro de acopio (CA).

$$\sum_{n \in FR} F4_{ni} + \sum_{m \in PV} F13_{mi} + F6_{p_1i} + \sum_{p \in PLN} F7_{pi} = F10_{ir} + F11_{is} + F12_{it} + F8_{iv} \quad (7.4)$$

$\forall i \in CA, p_1 \in PLA, r \in P1, s \in P2, t \in P3, v \in ET$

El balance de masa sobre cada uno de los puntos verdes se ve expresado en 7.5.

$$\sum_{n \in FR} F3_{nm} = F13_{mi} \quad \forall m \in PV, i \in CA \quad (7.5)$$

El balance de masa sobre la estación de transferencia (ET) se ve expresado en la ecuación 7.6.

$$\sum_{n \in FR} F5_{nv} + F8_{iv} = F9_{vw} \quad \forall v \in ET, i \in CA, w \in RS \quad (7.6)$$

El balance de las franjas se ve reflejado en la ecuación 7.7. Aquí, se indica que para cada una de las n franjas, el flujo másico que sale hacia los puntos limpios, puntos verde, centro

de acopio y estación de transferencia es igual al flujo másico de residuos plásticos generado en la misma franja (E0).

$$F1_{np_1} + \sum_{p \in PLN} F2_{np} + \sum_{m \in PV} F3_{nm} + F4_{ni} + F5_{nv} = E0_n \quad (7.7)$$

$$\forall n \in FR, p_1 \in PLA, i \in CA, v \in ET$$

## Capacidades de instalaciones

Otras restricciones relevantes, son las capacidades que poseen las distintas instalaciones, y que los flujos de entrada a las mismas no excedan su capacidad máxima. A continuación, se presentan las relaciones que corresponden a respetar las capacidades máximas de cada uno de los puntos de almacenamiento, recolección, tratamiento y disposición del problema.

La suma de todos los flujos que van de las franjas (FR) al punto limpio antiguo (PLA), es menor o igual a la capacidad del punto limpio antiguo.

$$\sum_{n \in FR} F1_{np_1} \leq CAP1_{p_1} \quad \forall p_1 \in PLA \quad (7.8)$$

La suma de todos los flujos que van de las franjas (FR) a un punto limpio nuevo, es menor o igual a la capacidad de ese punto limpio nuevo específico.

$$\sum_{n \in FR} F2_{np} \leq CAP2_p, \quad \forall p \in PLN \quad (7.9)$$

La suma de los flujos que van desde las franjas (FR), puntos verde (PV), puntos limpio nuevos (PLN) y punto limpio antiguo (PLA) hacia el centro de acopio (CA), es menor o igual a la capacidad del centro de acopio.

$$\sum_{n \in FR} F4_{ni} + \sum_{m \in PV} F13_{mi} + F6_{p_1i} + \sum_{p \in PLN} F7_{pi} \leq CAP3_i \quad \forall i \in CA, p_1 \in PLA \quad (7.10)$$

El flujo que va del centro de acopio (CA) hacia la planta de tratamiento mecánico, es menor o igual a la capacidad de dicha planta de tratamiento.

$$F10_{ir} \leq CAP4_r \quad \forall i \in CA, r \in P1 \quad (7.11)$$

El flujo que va del centro de acopio (CA) hacia la planta de tratamiento de pirólisis, es menor o igual a la capacidad de dicha planta de tratamiento.

$$F11_{is} \leq CAP5_s \quad \forall i \in CA, s \in P2 \quad (7.12)$$

El flujo que va del centro de acopio (CA) hacia la planta de tratamiento de combustión, es menor o igual a la capacidad de dicha planta de tratamiento.

$$F12_{it} \leq CAP6_t \quad \forall i \in CA, t \in P3 \quad (7.13)$$

La suma de los flujos de las franjas (FR) y del centro de acopio a la estación de transferencia, es menor o igual a la capacidad de la estación de transferencia.

$$\sum_{n \in FR} F5_{nv} + F8_{iv} \leq CAP8_v \quad \forall \quad i \in CA, \quad v \in ET \quad (7.14)$$

El flujo que va de la estación de transferencia hacia el relleno sanitario, es menor o igual a la capacidad del relleno sanitario.

$$F9_{vw} \leq CAP9_w \quad \forall \quad v \in ET, \quad w \in RS \quad (7.15)$$

La suma de los flujos que van de las franjas a un determinado punto verde, es menor o igual a la capacidad de ese punto verde específico.

$$\sum_{n \in FR} F3_{nm} \leq CAP10_m, \quad \forall \quad m \in PV \quad (7.16)$$

## Restricciones lógicas de existencia

En esta sección se presentan las relaciones lógicas entre las variables y distintos flujos. Se desea representar lo siguiente: si la planta no existe, los flujos de entrada deben ser iguales a cero. Además, si los flujos que se dirigen a un posible punto de instalación son iguales a cero, dicha instalación no puede existir.

En las siguientes ecuaciones se representan lo mencionado anteriormente utilizando el método de la *gran M*, que permite crear una cota superior igual a cero en el caso de que una planta no exista. Si la planta existe, la cota superior es abierta, un valor muy grande, tan grande como para que esta restricción nunca sea activa. Esto se ve representado en las ecuaciones 7.17, 7.19 y 7.21.

Por otra parte, también se debe cumplir la sentencia recíproca, es decir, si todos los flujos que entran a un nodo son cero, entonces la planta asociada a ese nodo no debe existir. Eso está expresado en las ecuaciones 7.18, 7.20 y 7.22.

Para el caso de los elementos de PLN, se deben cumplir las relaciones 7.17 y 7.18, para cada uno de ellos.

$$\sum_n F2_{np} \leq A_p \cdot M, \quad \forall \quad p \in PLN \quad (7.17)$$

$$A_p \leq \sum_{n \in FR} F2_{np} \cdot M, \quad \forall \quad p \in PLN \quad (7.18)$$

Para el caso de la planta de tratamiento de pirólisis, se deben cumplir las relaciones 7.19 y 7.20.

$$F11_{is} \leq B_s \cdot M, \quad \forall \quad i \in CA, \quad s \in P2 \quad (7.19)$$

$$B_s \leq F11_{is} \cdot M, \quad \forall \quad i \in CA, \quad s \in P2 \quad (7.20)$$

Y para el caso de la planta de tratamiento de combustión, se deben cumplir las relaciones 7.21 y 7.22.

$$F12_{it} \leq C_t \cdot M, \quad \forall \quad i \in CA, \quad t \in P3 \quad (7.21)$$

$$C_t \leq F12_{it} \cdot M, \quad \forall \quad i \in CA, \quad t \in P3 \quad (7.22)$$

### 7.2.11. Funciones objetivo

Las funciones objetivo a minimizar corresponde a costos y puntajes ambientales, que se expresan en las ecuaciones 7.23 y 7.29.

#### Función de costos

La función F01 suma los costos de disposición final por tonelada (C01), los costos de operación del centro de acopio (C02), los costos de transporte del sistema completo (C03), los costos de operación de las plantas de tratamiento (C04) y los costos de instalación o inversión de las plantas de tratamiento y los puntos limpios (C05).

$$\min \quad F01 = C01 + C02 + C03 + C04 + C05 \quad (7.23)$$

En la ecuación 7.24 se explicita el cálculo de C01, donde se multiplica el costo de disposición por tonelada enviada al relleno sanitario, que se expresa con F9.

$$C01 = CDF \cdot F9_{vw}, \quad \forall \quad v \in ET, \quad w \in RS \quad (7.24)$$

En la ecuación 7.25 se utiliza el costo de operación del centro de acopio por tonelada y se multiplica por el flujo másico que entra al mismo.

$$C02 = COCA \cdot (F6_{p_i} + \sum_{p \in PLN} F7_{p_i} + \sum_{m \in PV} F13_{m_i} + \sum_{n \in FR} F4_{n_i}), \quad \forall \quad p_i \in PLA, \quad i \in CA \quad (7.25)$$



La ecuación 7.26 presenta la suma de todos los costos de transporte. CT corresponde al costo de transporte de los camiones recolectores, que trasladan los flujos que se dirigen a la estación de transferencia y al relleno sanitario; CTT corresponde al costo de transporte de los camiones de reciclaje, que trasladan los flujos que se dirigen al CA; y finalmente, CV corresponde al costo de transporte de los vehículos pequeños o particulares, que podrían trasladar flujos de las franjas a puntos de almacenamiento como PL y PV.

La estructura de la ecuación 7.26, específicamente los costos divididos en las capacidades de los vehículos se debe a cómo funciona en la realidad el costo de transporte de los residuos, que dependen por un lado de la distancia que se debe recorrer, y por otro, de la carga que lleva. Así, si el vehículo de transporte va lleno, el costo de transporte será el máximo que se pueda cobrar, mientras que si va con menos carga, el cobro será proporcional a dicha carga. También puede ocurrir que el flujo másico que debe ser transportado sea mucho mayor a la capacidad, si así es, entonces se cobrará más de un viaje del transporte de dichos flujos.

$$\begin{aligned}
C03 = & \frac{CT}{CAPCT} \cdot \left( \sum_{n \in FR} F5_{nv} \cdot D3_{nv} + F8_{iv} \cdot D6_{iv} + F9_{vw} \cdot D7_{vw} \right) + \\
& \frac{CTT}{CAPCTT} \cdot \left( F6_{p1i} \cdot D1_{p1i} + \sum_{p \in PLN} F7_{pi} \cdot D2_{pi} + \sum_{m \in PV} F13_{mi} \cdot D5_{mi} + \sum_{n \in FR} F4_{ni} \cdot D4_{ni} \right) + \\
& \frac{CV}{CAPCV} \cdot \left( \sum_{n \in FR} F1_{np1} \cdot D9_{np1} + \sum_{n \in FR} \sum_{p \in PLN} F2_{np} \cdot D10_{np} + \sum_{n \in FR} \sum_{m \in PV} F3_{nm} \cdot D8_{nm} \right) \\
& , \quad \forall v \in ET, \quad i \in CA, \quad w \in RS, \quad p_1 \in PLA
\end{aligned} \tag{7.26}$$

A continuación se presenta la ecuación 7.27, que corresponde a los costos de operación por tonelada de las distintas plantas de tratamiento multiplicados por los flujos que se dirigen a cada una de las plantas.

$$\begin{aligned}
C04 = & COPT1_r \cdot F10_{ir} + COPT2_s \cdot F11_{is} + COPT3_t \cdot F12_{it} \\
& , \quad \forall r \in P1, \quad s \in P2, \quad t \in P3, \quad i \in CA
\end{aligned} \tag{7.27}$$

Finalmente, los costos de inversión se presentan en la ecuación 7.28, que indica el costo de inversión de los puntos limpios y las plantas de tratamientos, multiplicados por la existencia de cada una de las instalaciones propuestas.

$$\begin{aligned}
C05 = & \sum_{p \in PLN} k1 \cdot CIPL_p \cdot A_p + k2 \cdot CIPT2_s \cdot B_s + k3 \cdot CIPT3_t \cdot C_t \\
& , \quad \forall s \in P2, \quad t \in P3
\end{aligned} \tag{7.28}$$

## **Función de puntaje ambiental**

A continuación, se presenta F02 que corresponde a la suma del puntaje ambiental total del sistema planteado. El análisis de la estructura de esta función es similar a la del costo de

transporte, aquí el puntaje otorgado a un método será máximo si la capacidad del tratamiento se llena, mientras que disminuirá si el flujo enviado a dicho tratamiento es menor. En este caso, la función está configurada de tal manera que los tratamientos deseados tengan el menor puntaje, así si se llenaran el total debería seguir siendo menor respecto al máximo que podría alcanzar.

$$\begin{aligned} \min \quad F02 = & \frac{F10_{ir}}{CAP4_r} \cdot S1_r + \frac{F11_{is}}{CAP5_s} \cdot S2_s + \frac{F12_{it}}{CAP6_t} \cdot S3_t + \frac{F9_{vw}}{CAP9_w} \cdot S4_w \\ & , \quad \forall \quad i \in CA, \quad r \in P1, \quad s \in P2, \quad t \in P3, \quad v \in ET, \quad w \in RS \end{aligned} \quad (7.29)$$

## 7.3. Discusiones

### 7.3.1. Costos de operación

Respecto a los costos de operación del centro de acopio (COCA), el valor obtenido considera que en el centro de acopio tratan 238 [t/mes], que corresponde a lo tratado en un año, según la información entregada por la municipalidad. Este valor también asume que el número de operarios se mantiene, es decir, el costo de operación por tonelada se terminó considerando como un costo fijo, independiente del flujo de entrada.

Para tratar tantas toneladas se requiere de más mano de obra, lo que significaría aumentar el ítem de los sueldos destinados a los operarios, que representa la fracción más importante de los costos de operación de la planta. Sin embargo, como se indicó en el párrafo anterior, esto no se consideró con el fin de poder obtener resultados que prefirieran el envío al centro de acopio.

Por otro lado, desde el punto de vista de la capacidad, el centro de acopio cuenta con 6.200 [m<sup>2</sup>], y si se considera que se deben apilar sacas de 1,1 [m<sup>3</sup>] y que la densidad aparente del plástico es de 0,04 [t/m<sup>3</sup>], se obtiene que es capaz de recibir 768 toneladas de plástico aproximadamente.

De esta manera, se puede decir que desde el punto de vista de la capacidad del centro de acopio es apropiado pensar que pueda recibir la masa recolectada anualmente en un sólo mes, sin embargo, desde el punto de vista operacional está muy lejos de la realidad, provocando que tratar una tonelada de residuo tenga un costo aproximado de 69 mil pesos. Este valor se explica por el flujo másico tratado mensualmente de residuos, que corresponden a 20 toneladas por mes aproximadamente y que el proceso se lleva a cabo casi en un 100% por los operadores, sin el uso intensivo de máquinas que agilicen el proceso (sólo la cinta transportadora).

Ahora, observando a modo general la Tabla 7.2 de costos operacionales, es importante notar que si se quiere reciclar el residuo plástico en la comuna (por gestión del municipio), sólo considerando los costos de operación, como costo base se tienen CLP\$5.900 para tratar una tonelada de plástico al mes en el centro de acopio. Luego, para continuar con el proceso

de tratamiento del mismo flujo másico que fue enviado al centro de acopio, se tiene un costo de al menos CLP\$9.400 en el tratamiento de combustión (el de menor valor), es decir, que para reciclar una tonelada al mes se tiene un costo total en el sistema de al menos CLP\$15.300 aproximadamente, que corresponde a casi CLP\$3.000 por sobre el costo de disposición final de una tonelada mensual.

Tomando en cuenta el caso actual en Chile, el reciclaje existente es el mecánico que en promedio tiene un costo de CLP\$21.000, es decir, sumado al proceso del centro de acopio es equivalente a un total de CLP\$26.900, más del doble (CLP\$12.500 aproximadamente) del costo de disposición final. En conclusión, considerando sólo los costos de operación, el escenario actual del país favorece económicamente la disposición final por sobre el reciclaje de los residuos producidos.

### 7.3.2. Costos de inversión

Como ya se explicó, se han seleccionado dos posibles casos para los costos de inversión: que la capacidad de las plantas de tratamiento sean capaces de recibir todo el flujo másico de residuo plástico que se genera en la comuna (mejor de los casos) o que sólo puedan ser capaces de recibir una fracción del flujo.

En el mejor de los casos, el centro de acopio tendría que recibir un flujo mayor a 200 toneladas por mes de residuo plástico, sin embargo, en el caso de que la capacidad de las plantas sólo cuenten con recibir 100 toneladas, ¿a qué tratamiento será mejor enviar el flujo?

Para responder la pregunta anterior, hay que considerar que de base la mejor situación es que no se tenga que invertir en nuevas instalaciones, debido a sus altos costos, en ese caso es esperable que parte del flujo que recibe el centro de acopio sea enviado a la planta de tratamiento mecánico greenplast [30], ya que actualmente estas existen en Chile. Ahora bien, si se requiere de otra planta para enviar la otra parte del residuo plástico que el tratamiento mecánico no puede recibir, sería probable que el sistema escoja el tratamiento por combustión por sobre el de pirólisis, ya que el primero implica un menor costo económico que el segundo desde el punto de vista operacional y de inversión [32] [35].

Es importante decir que es difícil definir si los costos de inversión indicados están correctamente estimados, sabiendo que estas tecnologías no existen o se encuentran en su versión *piloto* a baja escala. Desde la información recopilada y presentada, es posible notar la gran diferencia en costos de inversión entre la pirólisis y la combustión, siendo la primera considerablemente de mayor valor.

Si bien existen estudios en la actualidad que indican las ventajas y desventajas entre las dos tecnologías propuestas, se llega a la conclusión que preferir una u otra dependerá siempre del objetivo que se quiera lograr, sin embargo, en la mayoría de los casos la pirólisis es preferible por sobre la combustión [36]. A pesar de ello, el uso de la combustión en el tratamiento de los residuos en general, está ampliamente estudiada y es el proceso más utilizado de manera alternativa a la disposición final [41].

### 7.3.3. Costos de Transporte

En cuanto a los costos de transporte, no existe un registro de la distancia recorrida actualmente por los camiones ni los gastos asociados al consumo de combustible. Por lo tanto, no existe un valor del rendimiento específico ni para el camión recolector ni para el camión de reciclaje. De esta manera, fue necesario realizar cálculos para poder establecer los rendimientos de los distintos camiones, que se encuentran dentro de los rangos que fueron encontrados por bibliografía [42] [43].

En cuanto al vehículo particular, el Ministerio de Energía cuenta con una página en línea que presenta los rendimientos de distintos vehículos livianos y medianos [44]. Para obtener el rendimiento de vehículos particulares se consideraron los autos livianos más vendidos del año 2018 [45] y se obtuvo un rendimiento promedio de todos ellos, presentados en la Tabla 7.7.

Al observar la Tabla 7.7, se puede decir que el transporte de menor valor es el particular y el de mayor el realizado por el camión recolector, sin embargo, en cuanto a las capacidades es al contrario, la mayor capacidad la tiene el camión recolector y el menor los vehículos particulares.

A partir de esta tabla se podría predecir que el sistema preferirá los trayectos realizados por los autos particulares hacia los puntos de almacenamiento, debido a su bajo costo, y que se intentará llevar la mayor cantidad de residuos al centro de acopio por este medio. Sin embargo, para poder decidir esto con mayor precisión es necesario conocer las distancias que deben recorrer los distintos medios de transporte.

### 7.3.4. Puntajes asignados a los distintos tratamientos

En el caso de los puntajes presentados en la Tabla 7.8 se buscó otorgar los menores puntajes al tratamiento mecánico y los mayores a la disposición final, respetando la jerarquía para el manejo de residuos presentada en la introducción [6]. En cuanto al puntaje lineal, la diferencia de puntaje entre la disposición y el tratamiento de combustión es menor que en el caso del puntaje no lineal.

Considerar una mayor diferencia de puntaje entre la disposición final y los tratamientos de revalorización energética propuestos tiene más sentido que el caso lineal, ya que la bibliografía encontrada destaca que en la mayoría de los casos disponer en el relleno sanitario debería ser la última opción a considerar frente a los otros tratamientos propuestos [36]. De todas formas, este análisis podrá ser verificado al momento de evaluar los resultados finales que se obtengan a partir de la optimización de la formulación planteada.

Además, es relevante destacar que pirólisis y combustión, ambos tratamientos corresponden a métodos de revalorización energética, ¿cómo diferenciarlos?. Respecto a estudios realizados de análisis de ciclo de vida, se ha concluido que es medio ambientalmente mejor realizar el proceso de pirólisis que el de combustión [36], debido a que posee una mejor evaluación en la mayoría de las categorías de impacto analizadas [46], principalmente es un

mejor proceso al momento de querer obtener energía a partir de residuos [47]. Es por ello que se han ordenado de la manera en que se presenta en la Tabla 7.8.

### 7.3.5. Condiciones iniciales

Respecto a la Tabla 7.9, se puede indicar que los valores de flujos máxicos generados por cada una de las franjas tienen sentido debido a que están en relación directa con el área de cada una de las franjas.

De esta manera, lo que se podría esperar es que las franjas que producen mayores flujos máxicos de residuos plásticos sean las que tendrán flujos mayores de salida a los puntos de almacenamiento o a la estación de transferencia, o quizá sean las que prefieran el uso de puntos limpios y/o verdes, centralizando con ello la salida de materiales desde cada franja.

### 7.3.6. Distancias

En cuanto a las distancias, se consideró que los viajes son de ida y vuelta, y que además sólo se realizan traslados de un punto a otro, por ejemplo, si una familia o persona quiere llevar sus residuos a algún punto de almacenamiento como a un punto verde o limpio, se dirige desde su vivienda hacia el punto de recolección y luego retornará a su vivienda, sin ir a otros destinos en el mismo viaje. Del mismo modo un camión de reciclaje partirá su trayecto desde el centro de acopio hasta algún punto verde o punto limpio y luego retornará al centro de acopio, sin dirigirse a otro destino en el mismo viaje.

Analizar los traslados de esta manera no considera que el camión podría tener un uso parcial de su capacidad de carga. Por lo tanto, es probable que de esta forma se realicen más viajes de lo que realizaría un camión en la realidad.

Es importante enfatizar que el enfoque de este proyecto no es solucionar problemas de *ruteo*, y este es el motivo por el que no se consideraron rutas alternativas para los distintos vehículos que participan en el problema. Al mismo tiempo, al no tener información de todas las rutas recorridas por los camiones de reciclaje ni los recolectores, las distancias obtenidas entre las franjas y el centro de acopio, y las franjas y la estación de transferencia fueron estimadas mediante el uso de herramientas como Google Earth y podrían estar subestimadas.

A pesar de que las mediciones realizadas puedan estar subestimadas, la representación de las franjas permite incluir un problema de organización que la la municipalidad sí considera, a pesar de que la medición sea aproximada permite estimar un posible costo asociado al transporte de los flujos de residuo plástico.

# Capítulo 8

## Solución problema de optimización

Finalmente, luego de tener la formulación del problema y todos los datos necesarios para resolverlo, es posible ejecutar el modelo en alguna herramienta computacional útil para ejecutar y resolver este tipo de problemas.

Con el o los resultados que se obtengan en este capítulo, será posible concluir respecto al funcionamiento actual de la comuna y cómo podría mejorar.

### 8.1. Metodología

Para la resolución del problema planteado en este trabajo se siguen los siguientes pasos:

1. Primero, se selecciona la herramienta computacional con la que se trabajará. Para efectos de este trabajo, esta corresponde a GAMS.
2. Para este proyecto se proponen cuatro problemas a resolver, el caso de las capacidades de las instalaciones igual a 300 [t/mes] para los dos escenarios de puntajes propuestos. Y, análogamente, el caso de las instalaciones con capacidades de iguales a 100 [t/mes], para los mismos dos escenarios. De esta manera para cada situación se deberán utilizar los parámetros correspondientes.
3. Una vez el código esta completo, se ejecuta el programa y se utiliza el método de programación por metas, con el fin de poder confeccionar la curva de Pareto y así poder obtener el conjunto solución.
4. Luego de esto, se selecciona una solución óptima que se encuentre en el conjunto de soluciones óptimas.
5. Al seleccionar dicha solución es posible esquematizar la solución con los flujos resultantes.
6. Se itera el procedimiento para cada una de las situaciones propuestas.

A continuación, en la Figura 8.1 se presenta a modo resumen los pasos a seguir.

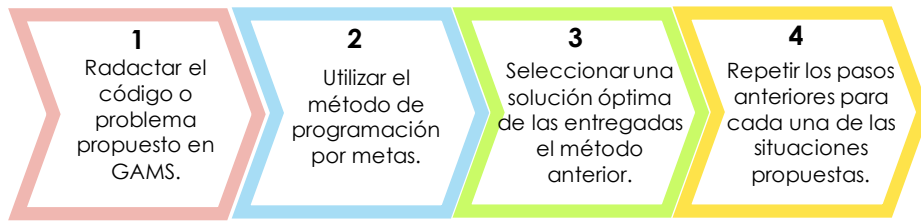


Figura 8.1: Esquema de trabajo para obtener la solución del problema de optimización.

## 8.2. Optimización multiobjetivo

A continuación se presentan los resultados obtenidos aplicando el método de programación por metas. Para mayor detalle de los resultados revisar la sección de Anexos D.1. Los puntos graficados tanto para el caso sin normalizar como el normalizado se encuentran en la misma sección de anexos mencionada.

### 8.2.1. Problema 1. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 1

Para este caso, entre los parámetros se considera que las plantas de tratamiento cuentan con una capacidad de 100 toneladas, que implica que los costos de inversión son aquellos presentados para este caso. Además, se considera el puntaje lineal.

Con todas las condiciones anteriores y aplicando el método de programación por metas estableciendo distintos porcentajes de importancia para cada una de las funciones mono objetivo, las soluciones normalizadas son los puntos que se presentan en la Figura 8.2, y al unir los puntos se presenta la frontera de Pareto. Además, el punto ideal se presenta con color celeste y el punto anti ideal con naranja.

Los valores reales de los puntos ideal y anti ideal se presentan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Valores reales punto ideal y anti ideal.

Puntos	Valor
F01 IDEAL	6.508.550
F02 IDEAL	0,815
F01 ANTI IDEAL	6.878.649
F02 ANTI IDEAL	1,000

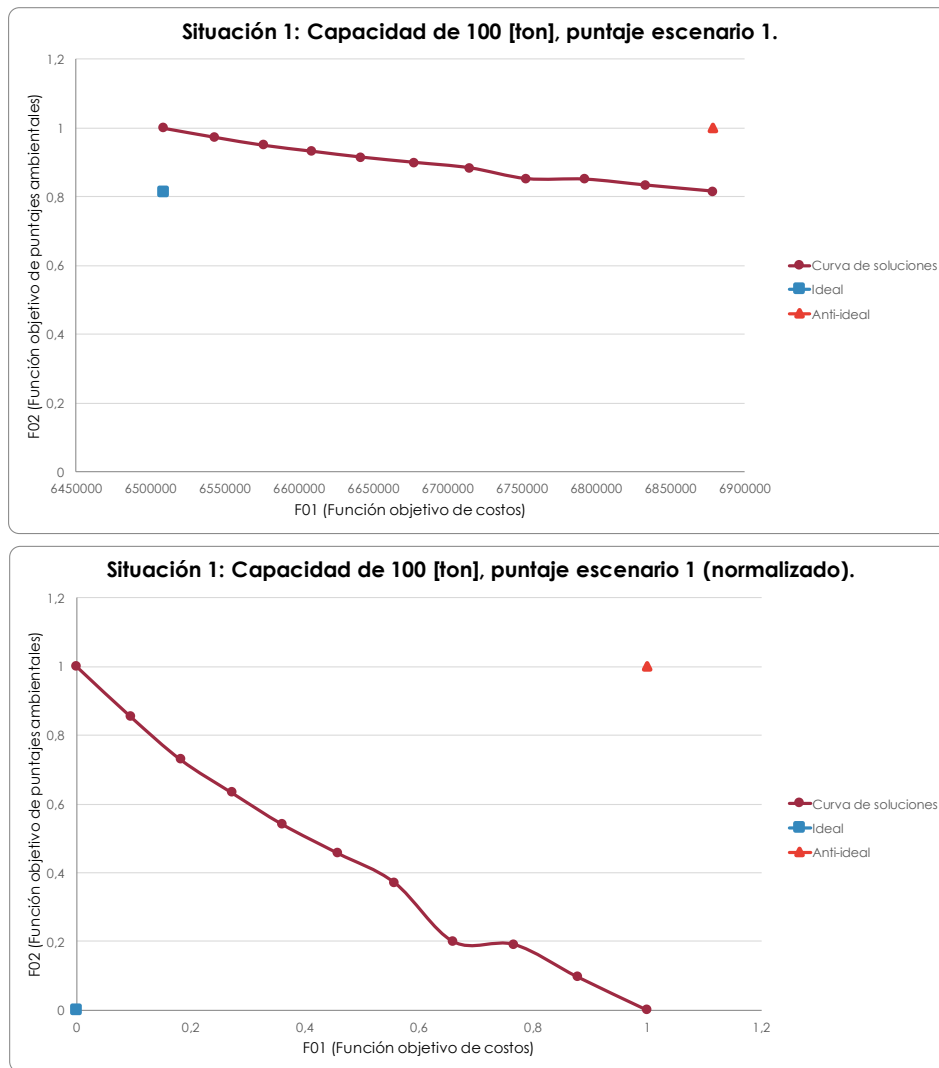


Figura 8.2: Soluciones óptimas para el problema 1. (Elaboración propia)

## Discusiones

En la Figura 8.2 se presenta la Frontera de Pareto, considerando las siguientes condiciones: capacidad de las plantas de tratamiento igual a 100 [t] y el puntaje escenario 1, correspondiente al lineal, Tabla 7.8.

En este caso, debido a la diferencia de magnitudes entre los costos y el puntaje se han normalizado los valores de las funciones, siendo el punto ideal el cero del gráfico y el punto anti ideal, igual a 1.

A partir de los valores reales que se obtienen para los puntos ideal y anti ideal presentados en la Tabla 8.1, se puede inferir que las variables binarias son iguales a 0, es decir, no existen nuevas instalaciones, esto se observa por los costos obtenidos entre el mejor y el peor caso no superan los 10 millones de pesos, y los costos de las instalaciones propuestas superan los 100 millones de pesos como se presenta en la Tabla 7.5.



Por otro lado, los puntajes ambientales ideal y anti ideal no normalizados son cercanos e iguales a 1, respectivamente, es decir, en el caso anti ideal es probable que todo el flujo másico de residuo plástico se dirija a disposición final. Por otro lado, en el valor del puntaje ideal es probable que el flujo se divida entre la planta de tratamiento mecánico y la disposición final, debido a que no existirían nuevas instalaciones.

### 8.2.2. Problema 2. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 2

Se realiza el mismo procedimiento del caso anterior, esta vez aplicando nuevamente 100 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento, pero considerando el caso 2 de los puntajes, que corresponden a los obtenidos a partir de una función cúbica.

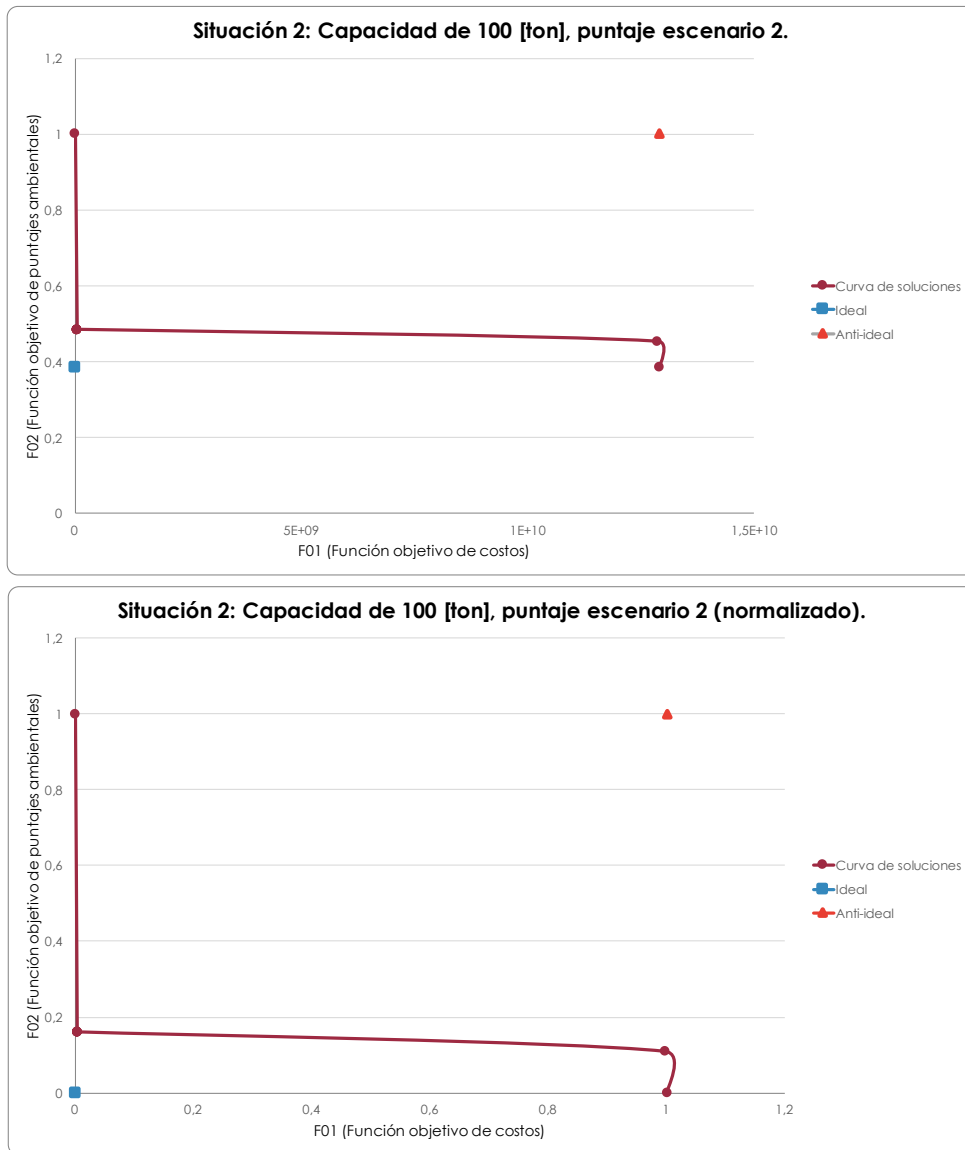


Figura 8.3: Soluciones óptimas para el problema 2. (Elaboración propia)

Los valores reales de los puntos ideal y anti ideal se presentan en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Valores reales punto ideal y anti ideal.

Puntos	Valor
F01 IDEAL	6.508.550
F02 IDEAL	0,385
F01 ANTI IDEAL	12.894.940.000
F02 ANTI IDEAL	1,000

## Discusiones

En la segunda situación, se considera que la capacidad de las instalaciones también es 100 toneladas pero los puntajes están distribuidos según el escenario 2, correspondiente al no lineal, Tabla 7.8.

Al igual que el problema anterior, los puntajes están normalizados, y los puntajes reales de los puntos ideal y anti ideal se presentan en la Tabla 8.2. A partir de ella se puede inferir que sí podrían existir instalaciones, por el valor sobre 12 mil millones de pesos obtenidos para el punto anti ideal de los costos.

Como sí podrían existir instalaciones en este escenario, tiene sentido que el valor ideal del puntaje sea cercano a cero.

De todas maneras, el caso ideal del costo tiene el mismo valor que el problema anterior, y en relación al puntaje, si el costo es ideal, el puntaje no y es cercano a 1 como se presenta en la Tabla 8.2.

A diferencia del problema anterior, se observan sólo 3 puntos para graficar Pareto, como se muestra en la Figura 8.3, ya que al variar la importancia de ambas funciones objetivos esos fueron todos los resultados entregados, o se aproximaban a los valores presentados. Esto se verifica al acercarse al punto cercano al valor ideal, como se muestra en la Figura 8.4. Este comportamiento podría deberse a la gran diferencia que existe en los costos entre invertir o no en nuevas instalaciones, pasando de rangos de 6 millones a 12 mil millones.

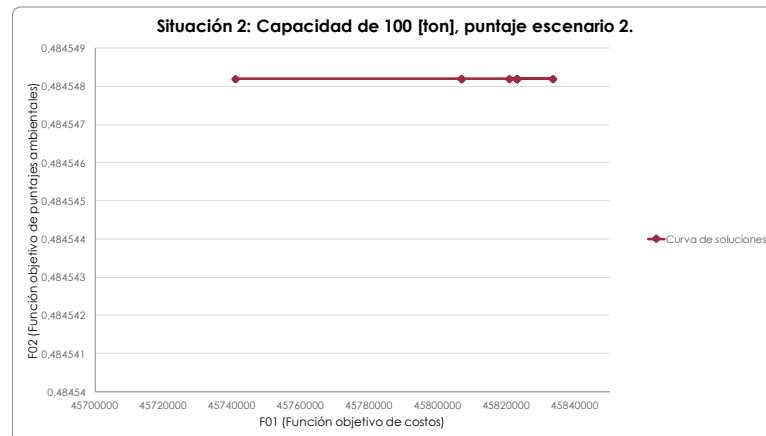


Figura 8.4: Acercamiento a soluciones del problema 2. (Elaboración propia)

### 8.2.3. Problema 3. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 1

Análogo al problema 1, en este caso se establecen 300 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento del sistema y se utilizan los puntajes lineales.

Los valores reales de los puntos ideal y anti ideal se presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Valores reales punto ideal y anti ideal.

Puntos	Valor
F01 IDEAL	6.508.550
F02 IDEAL	0,273
F01 ANTI IDEAL	7.494.044
F02 ANTI IDEAL	1,000

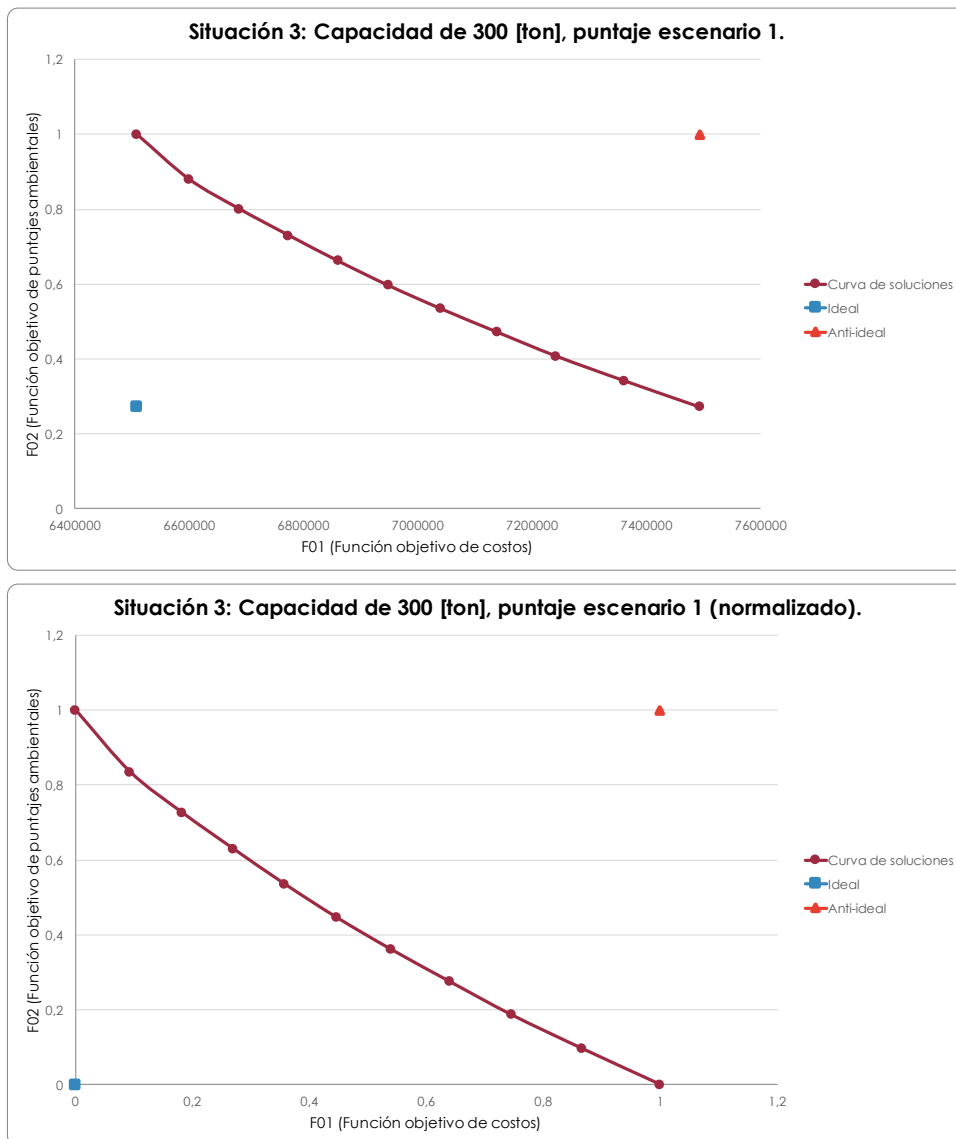


Figura 8.5: Soluciones óptimas para el problema 3. (Elaboración propia)

## Discusiones

Ahora, se presentarán dos situaciones considerando que las instalaciones cuentan con una capacidad de 300 [t]. En particular en este problema, se considerará el puntaje del caso 1, Tabla 7.8.

Como se mencionó en las discusiones de costos de operación e inversión, lo que se esperaría en caso de destinar flujos a tratamientos, es que no existieran nuevas instalaciones y todo se dirija al tratamiento mecánico y/o a disposición final.

Según los costos obtenidos para los puntos ideal y anti ideal presentados en la Tabla 8.3, nuevamente los costos no superan los 10 millones de pesos, es decir, no existen nuevas instalaciones en el conjunto de solución.

En cuanto a los puntajes, ambos casos son diferentes, se presenta un valor cercano a cero y otro igual a 1, es decir, probablemente en un caso se dirige mayoritariamente el flujo hacia el tratamiento mecánico, y en el otro se dirige en mayor proporción o por completo a disposición final.

La forma de la curva que se presenta en la Figura 8.5 tiene sentido, ya que cuando es el mejor caso de una función, es decir el mínimo, se cumple que es el máximo de la otra. Además, los puntos se distribuyen como es de esperar.

### 8.2.4. Problema 4. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 2

Análogo al problema 2, en este caso se establecen 300 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento del sistema y se utilizan los puntajes no lineales.

Los valores reales de los puntos ideal y anti ideal se presentan en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4: Valores reales punto ideal y anti ideal.

Puntos	Valor
F01 IDEAL	6.508.550
F02 IDEAL	0,168
F01 ANTI IDEAL	7.494.044
F02 ANTI IDEAL	1,000

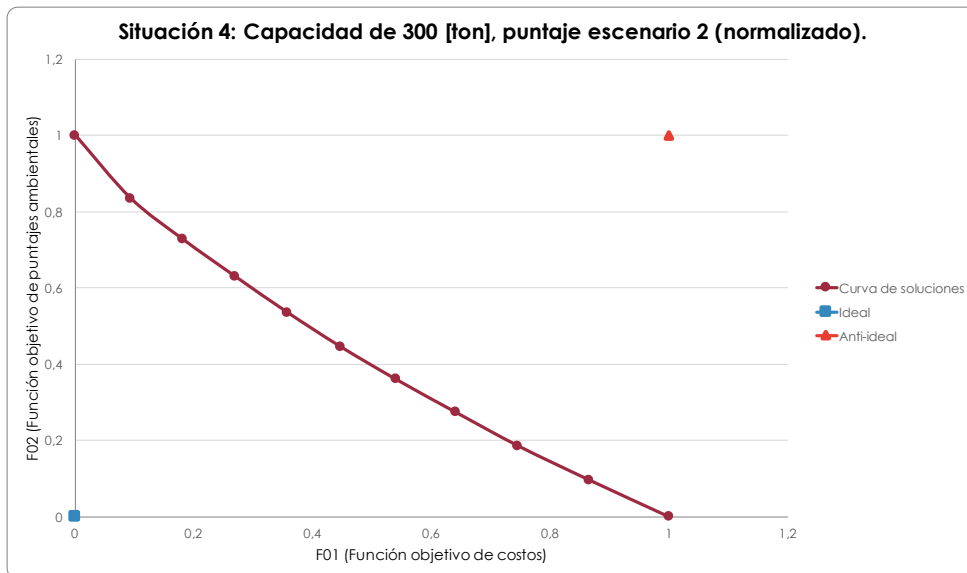
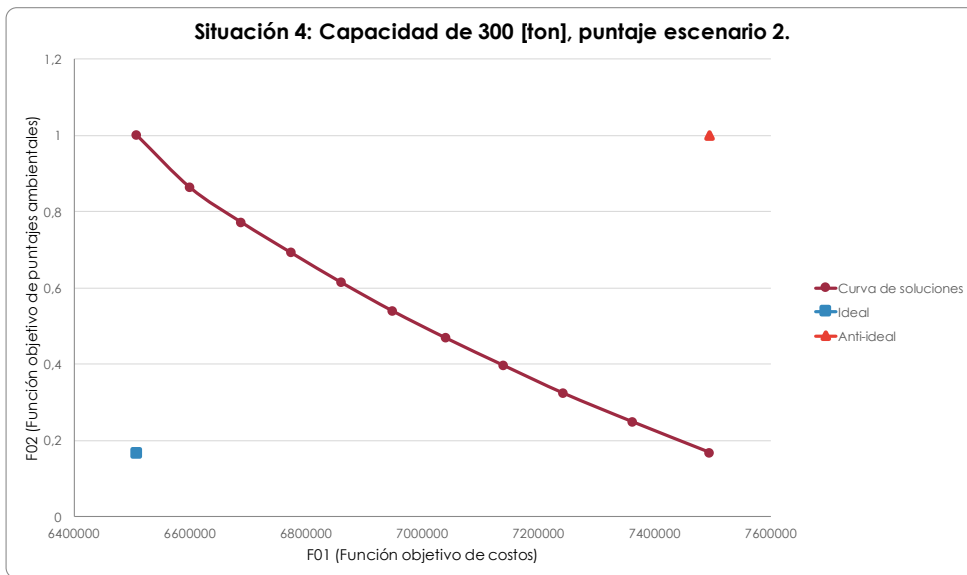


Figura 8.6: Soluciones óptimas para el problema 4. (Elaboración propia)

## Discusiones

Nuevamente se considera que las instalaciones poseen capacidades de 300 [t], pero ahora con una distribución de puntajes según el caso 2, Tabla 7.8.

El análisis para este caso es igual que para el caso anterior, de hecho, se puede observar en la Tabla 8.4 que los valores de los costos son iguales a los del caso anterior, sólo cambian los puntajes como es de esperar, ya que el tratamiento mecánico posee menor puntaje asociado que en el caso anterior.

La curva también se comporta de la manera esperada como en el problema anterior. A partir de este resultado se puede concluir que si la capacidad del tratamiento mecánico es suficiente para recibir todo el flujo de residuo plástico generado, no se requieren

nuevas instalaciones, y probablemente esto será independiente del puntaje otorgado a las instalaciones mientras se respete la jerarquización de manejo de residuos.

### 8.3. Óptimo

A continuación se presentarán las soluciones óptimas seleccionadas para cada uno de los problemas propuestos. Para mayor detalle revisar la sección Anexos D.2.

#### 8.3.1. Problema 1. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 1

Para el problema 1 se selecciona la solución que contempla una importancia del 50% para la función de costos y 50% para la función de puntajes. Con esta definición los valores obtenidos se presentan en la Tabla 8.5 y el esquema de flujos del sistema se muestran en la Figura 8.7.

Con esta solución se tratan 54,27 toneladas de residuo plástico al mes, lo que equivale al 23,6%.

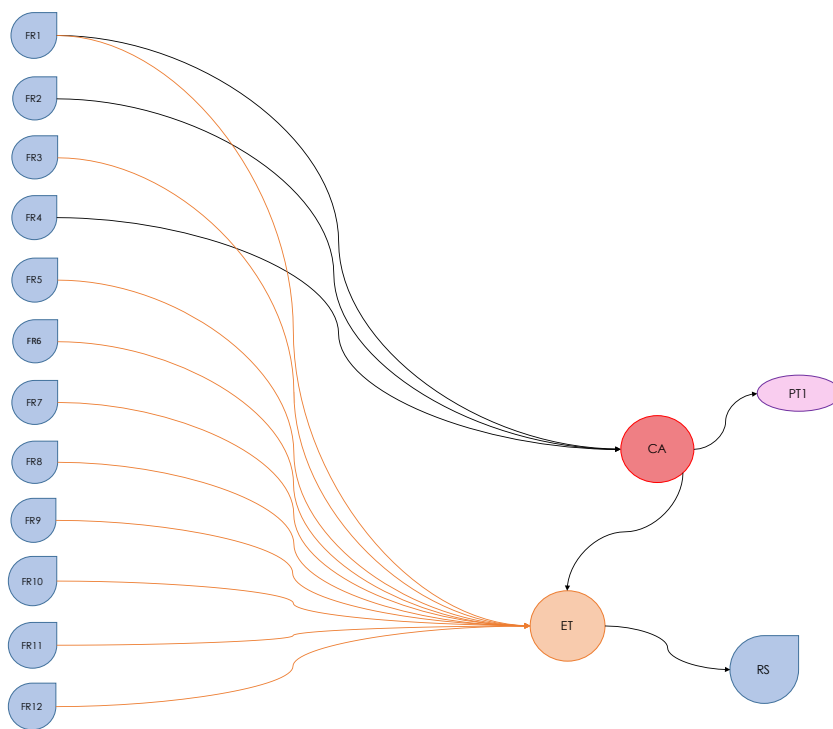


Figura 8.7: Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 1. (Elaboración propia)

Tabla 8.5: Problema 1: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes.

Función	Valor	Unidad
C01	2.196.967	\$/mes
C02	355.787	\$/mes
C03	2.985.307	\$/mes
C04	1.139.725	\$/mes
C05	0	\$/mes
F01	6.677.786	\$/mes
F02	0,899	-

## Discusiones

Dentro del conjunto solución, se considera aquella solución que contemple la misma importancia para ambas funciones, obteniendo el resultado que se presenta en la Tabla 8.5. De aquí se desprende que:

- El costo de disposición final (C01) existe, por lo tanto, hay un flujo que se dirige al Relleno Sanitario.
- El costo de operación del centro de acopio (C02) también existe, es decir, hay flujos que se dirigen al centro de acopio.
- El costo de transporte (C03) existe y es cercano a 3 millones de pesos.
- El costo de operación de las plantas (C04) existe, es decir, hay un flujo que se dirige al tratamiento mecánico.
- Finalmente, el costo de inversión (C05) es igual a cero, no existen nuevas instalaciones como se había supuesto para el conjunto solución.

Todo lo anterior se afirma con la Figura 8.7, esquema que muestra los flujos existentes para esta solución. Se observa que los flujos generados por las franjas presentan una clara tendencia a dirigirse en su mayoría a la estación de transferencia, y sólo 3 franjas dirigen sus flujos hacia puntos de almacenamiento y tratamiento.

Este resultado tiene relación directa con la manera en que están distribuidos los puntajes, donde la configuración de la función objetivo ambiental tiene combinaciones en que enviar plástico a nuevos puntos de instalación puede hacer que la sumatoria del puntaje total sea mayor en comparación a enviar todo directamente a disposición final.

### 8.3.2. Problema 2. Capacidad de 100 toneladas, puntaje caso 2

Para el segundo problema, de acuerdo a la curva presentada el punto más cercano al ideal es el obtenido con una importancia del 90 % para los costos y 10 % para los puntajes. En base a esto los valores obtenidos para las funciones mono objetivo se presentan en la Tabla 8.6 y el esquema del resultado de los flujos se muestra en la Figura 8.8.

Con esta solución se tratan 200 toneladas de residuo plástico al mes, lo que equivale al 86,9%.

Tabla 8.6: Problema 2: Resultados de las variables considerando un 90 % de importancia para la función de costos y un 10 % para la función de puntajes.

Función	Valor	Unidad
C01	375.375	\$/mes
C02	1.357.177	\$/mes
C03	1.611.519	\$/mes
C04	3.040.000	\$/mes
C05	39.439.040	\$/mes
F01	45.823.112	\$/mes
F02	0,485	-

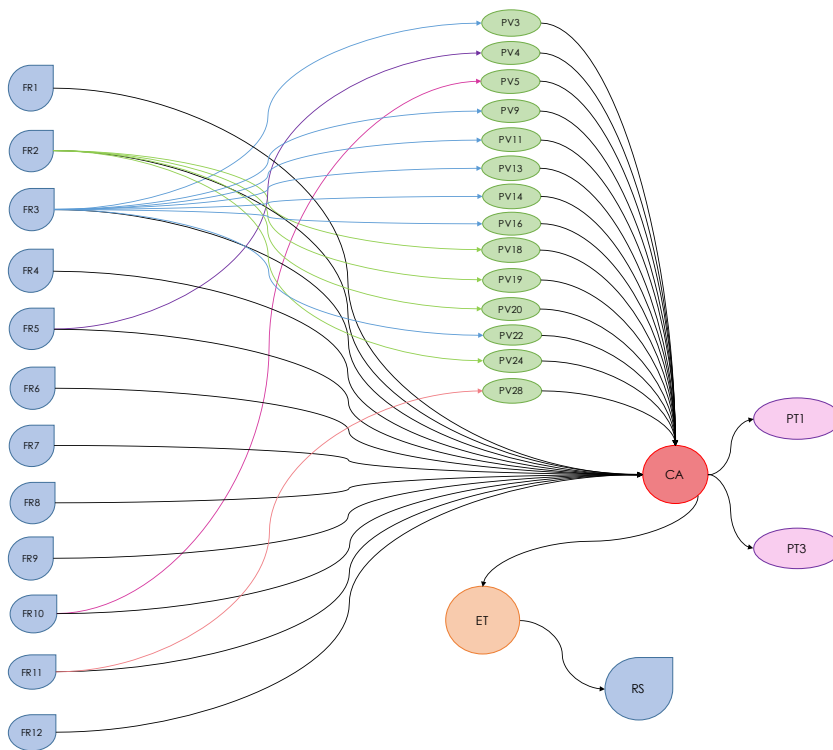


Figura 8.8: Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 2. (Elaboración propia)



## Discusiones

A partir de la Figura 8.3 se observa que existe un punto que se acerca significativamente a la solución ideal, dicha solución se obtiene otorgando una importancia del 90 % a la función de costos y un 10 % a la función ambiental. El resultado de dicha combinación se presenta en la Tabla 8.6, y se concluye que:

- C01 existe, lo que indica que hay disposición final, sin embargo el valor que tiene es menor a C02, implicando que el flujo que va al relleno es menor que el reciclado.
- C02 indica que hay un flujo tratado en el centro de acopio.
- C03 posee un valor cercano a los 2 millones de pesos, menor al caso anterior.
- C04, indica que se trata un flujo en las plantas.
- C05 existe, por lo tanto, hay instalaciones nuevas.

A diferencia del problema anterior, aquí todos los flujos desde las franjas se dirigen hacia el centro de acopio. Además, se observa que dentro de las instalaciones propuestas, la optimización indica que el tratamiento de combustión es el tratamiento recomendado para instalar, lo que se relaciona con el costo de instalación de la planta de pirólisis y la baja diferencia de puntajes que poseen ambos tipos de tratamiento. Por otro lado, esta solución hace uso de la mitad de puntos verdes existentes en la actualidad.

### 8.3.3. Problema 3. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 1

Para este caso, se selecciona la solución que entrega una importancia del 50 % para la función de costos y 50 % a la de puntajes. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 2.3 y el esquema representativo en la Figura 8.9.

Con esta solución se tratan 114,64 toneladas de residuo plástico al mes, lo que equivale al 49,8 %.

Tabla 8.7: Problema 3: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes.

Variable	Valor	Unidad
C01	1.442.331	\$/mes
C02	751.552	\$/mes
C03	2.346.918	\$/mes
C04	2.407.514	\$/mes
C05	0	\$/mes
F01	6.948.315	\$/mes
F02	0,597	-

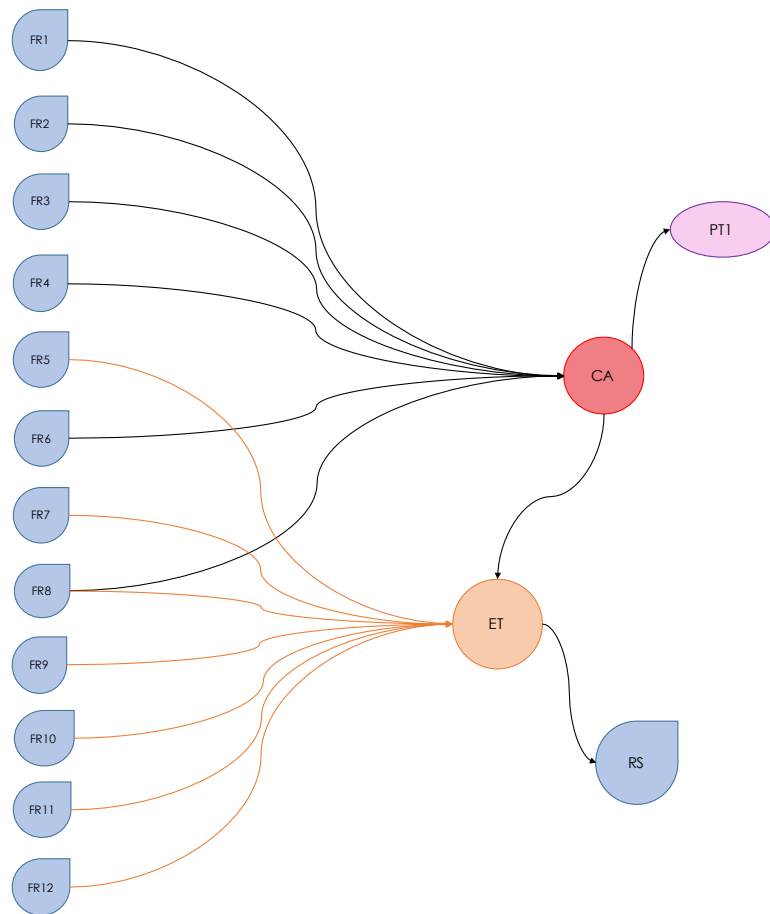


Figura 8.9: Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 3. (Elaboración propia)

## Discusiones

Al igual que en el problema 1, se decide seleccionar el caso en que ambas funciones poseen la misma importancia. El resultado de esta situación se presenta en la Tabla 8.7. A partir de este, se concluye que:

- C01 existe, sin embargo, es menor que el presentado en el problema 1, por lo que se podría predecir que el flujo que va al relleno sanitario es menor que en el primer problema presentado.
- C02, también existe y es mayor que el valor del problema 1, es decir, el flujo que se envía a CA es mayor que en el primer problema.
- C03 posee un valor mayor a 2 millones de pesos.
- C04 existe, es decir, hay un flujo tratado en la planta de tratamiento mecánico.
- C05 es igual a cero, no existen nuevas instalaciones.

A partir del esquema presentado en la Figura 8.9 se puede observar que las primeras franjas se dirigen al CA, que son las que generan una mayor cantidad de residuos plásticos

(Tabla 7.9), mientras que las franjas que generan menos residuo, en su mayoría, se dirigen a la estación de transferencia.

### 8.3.4. Problema 4. Capacidad de 300 toneladas, puntaje caso 2

Análogo al problema 3, se selecciona la solución de 50 % para la función de costos y de 50 % para la de puntajes, obteniendo como resultado los valores que se presentan en la Tabla 8.8 y el esquema de flujos de la Figura 8.10

Con esta solución se tratan 114,64 toneladas de residuo plástico al mes, lo que equivale al 49,8 %.

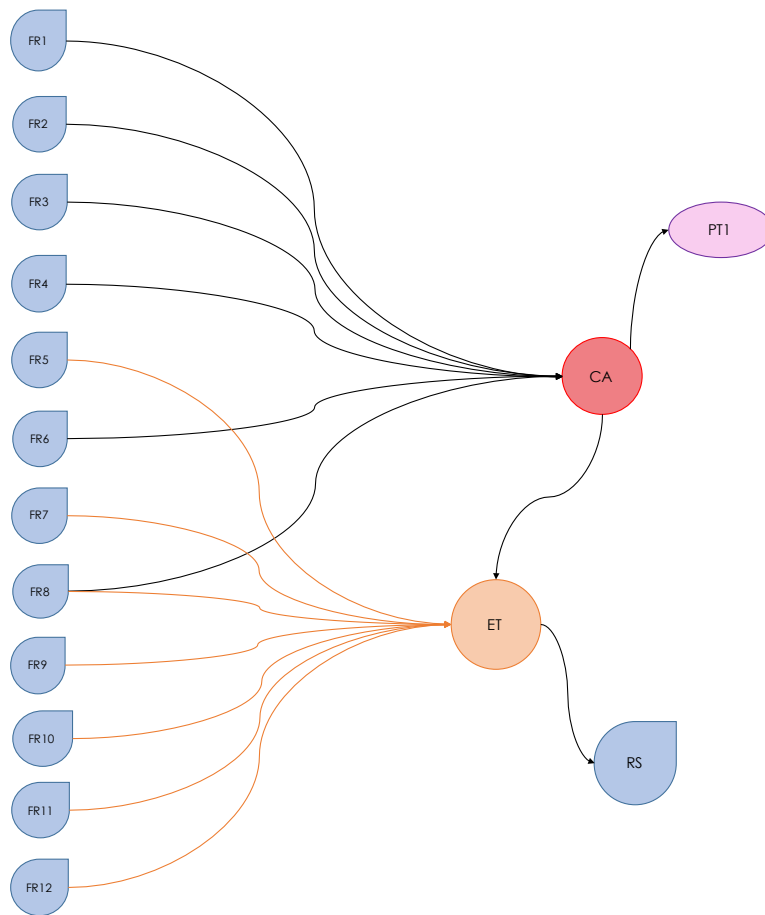


Figura 8.10: Esquema representativo de la solución óptima escogida para el problema 4. (Elaboración propia)

Tabla 8.8: Problema 4: Resultados de las variables considerando un 50 % de importancia para la función de costos y un 50 % para la función de puntajes.

Variable	Valor	Unidad
C01	1.442.331	\$/mes
C02	751.552	\$/mes
C03	2.346.918	\$/mes
C04	2.407.514	\$/mes
C05	0	\$/mes
F01	6.948.315	\$/mes
F02	0,539	-

## Discusiones

En este caso, también se selecciona la solución que le entrega la misma importancia a ambas funciones, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 8.8 y en el esquema de la Figura 8.10.

El resultado obtenido en este problema es igual al problema anterior, sólo varía el puntaje obtenido, sin embargo, las soluciones de cada uno de los costos y el esquema obtenido es exactamente igual a la situación anterior.

Las observaciones presentadas para el problema 3 también aplican para el problema 4.

## 8.4. Discusiones generales

De acuerdo a los resultados obtenidos, lo primero que se puede deducir es que para el caso en que las plantas de tratamiento cuenten con una capacidad de 300 toneladas mensuales, independiente del puntaje asignada a cada uno de los tratamientos de residuo plástico, el resultado es el mismo. Se envía casi el 50 % del flujo másico al tratamiento mecánico y no se utilizan puntos verdes ni limpios. Esto último puede tener relación con el costo de mover pequeños flujos en comparación con trasladar flujos mayores directamente desde las franjas al centro de acopio y no en localizaciones intermedias.

Por otro lado, de manera global, ningún resultado presenta en su solución el transporte de flujos de plástico a los puntos limpio, en ningún caso, ya sea el punto que existe actualmente o los propuestos en las ubicaciones de los microbasurales. Esto también puede deberse a la formulación del problema, particularmente en los costos de transporte y en las distancias medidas entre los distintos nodos.

En la solución del problema 2, es la única solución que presenta flujos destinados a los puntos verdes, sin embargo, los flujos desde las franjas se dirigen todos al centro de acopio. En esta solución la capacidad de las plantas es de 100 toneladas mensuales y se utiliza el escenario 2 de puntajes. Es posible que se de esta configuración, ya que el problema considera costos de transporte elevados para el camión de reciclaje, y en comparación con los flujos que transporte el camión, los flujos a los puntos verdes son bastante menores, es probable que al

momento de buscar el mínimo costos, llega el punto en que para trasladar pequeños flujos es mejor utilizar vehículos pequeños.

Otro resultado relevante, es que en todos los casos se utiliza el tratamiento mecánico en alguna medida. Junto con esto, también se obtiene que el mínimo porcentaje tratado del flujo de residuos plásticos es de 24 % aproximadamente, y el máximo un 87 %.

Llama la atención que la primera solución sólo traslada el flujo de 3 franjas al centro de acopio, y actualmente en la comuna sólo se retiran los residuos plásticos de algunas villas de la comuna, lo que no supera el 1 % de las viviendas [13]. A pesar de eso, en esta solución se trata casi el 24 % del residuo plástico, situación que es mejor en comparación al 1 % que recicla actualmente la comuna.

A partir de todos los resultados planteados destacan algunas observaciones adicionales que son transversales e independientes de las condiciones de cada caso.

Los costos de transporte varían entre los 2 y 3 millones de pesos aproximadamente. Este valor está muy por debajo de los 92 millones de pesos (aproximadamente) que la Municipalidad entrega mensualmente a la empresa encargada del transporte y recolección de residuos [13], es decir, el costo por transporte del camión recolector utilizado está subestimado respecto al valor real. Esto se debe a que para el cálculo del costo de transporte se consideró sólo el rendimiento del camión. Tampoco se han considerado las utilidades de esas empresas, lo que incluiría el contrato de operarios y pagos adicionales por mantenciones, entre otras cosas.

Considerar un costo más elevado para el costo de transporte podría entregar resultados diferentes a los obtenidos.

En la solución del problema 2, se observa entre los tratamientos propuestos se prefiere el de combustión. Este resultado tiene sentido respecto a casos conocidos como lo que ocurre en Japón [41], país en el que se dispone poco plástico, sin embargo, para reducir el plástico de disposición, lo que se utiliza es la combustión. Respecto a los datos presentados en este trabajo, la selección de dicho tratamiento tiene directa relación tanto con sus costos de operación como sus costos de instalación.

Además de lo ya indicado, falta destacar la importancia del centro de acopio y del camión de reciclaje. Para poder obtener resultados como el presentado en el problema 2, es necesario que el centro de acopio pueda estar preparado a tratar mayores cantidades de residuos que los que tratan hoy. Por otra parte, actualmente el camión de recolección de residuos no se dirige a todas las franjas de la comuna, sólo retira los residuos del 1 % de la comuna, lo que tiene relación con la disponibilidad de retiros [13].

# Capítulo 9

## Observaciones generales

Luego de todo el trabajo realizado, es posible expresar algunas recomendaciones para proyectos futuros que tengan relación con lo presentado.

En primer lugar, para que una metodología como esta pueda funcionar y entregar resultados cercanos a la realidad, es importante que existan valores para los parámetros necesarios de utilizar, que exista información concreta de lo que ocurre en la comuna. Principalmente, falta registrar los flujos de residuos en masa que son retirados de los distintos puntos de almacenamiento, como también falta registrar la cantidad y tipos de residuos que llegan al centro de acopio, con el fin de poder analizar qué porción del flujo de entrada se está tratando y cuánto se está vendiendo y/o enviando a las plantas de tratamiento existentes.

También falta tener mayor información respecto a los rendimientos de los camiones utilizados, en este caso, hubiese sido adecuado haber establecido un nexo con la empresa de recolección y transporte de residuos, de manera de haber tenido a disposición los datos necesarios para el desarrollo del problema.

Además de conocer los rendimientos de los camiones, una mejora al modelo planteado sería incluir la ruta de los camiones, con el fin de obtener valores de costo de transporte más apropiados.

Por otro lado, los aspectos a destacar del trabajo realizado es que a pesar de sus mejoras, es posible aplicar la metodología de trabajo para el caso de otras comunas del país, e incluso podría ser de utilidad si se aplicara para el caso de la Región Metropolitana completa, si bien el sistema se volvería más complejo por la cantidad de elementos que participarían, el método de trabajo permitiría entregar una imagen de lo que ocurre actualmente en la región.

Las ventajas del modelo planteado, radica en que al menos permite enfocarse en aquella información de base necesaria para obtener un resultado adecuado para la toma de decisiones. Al formular el problema, pueden surgir algunas preguntas clave como: ¿Será mejor contratar una empresa de transporte de residuos que invertir en camiones de recolección? ¿Cuánto se está gastando en el centro de acopio por el tratamiento de una tonelada de residuo? ¿Será posible invertir en nuevas tecnologías para aumentar el flujo másico

de residuo a tratar? ¿Dónde se podrán ubicar nuevos puntos de almacenamiento de residuo o nuevas plantas de reciclaje? ¿Será el mejor recorrido el que toman los camiones? ¿Es adecuado el rendimiento de los camiones? ¿Qué intereses o motivaciones tienen los habitantes de la comuna para ir por su cuenta a los puntos de almacenamiento como los puntos verdes o limpios?

Finalmente, parece que la pregunta más relevante del trabajo es: ¿por qué actualmente no se recicla un mayor flujo másico de residuos? Luego de todo lo realizado, se podría decir que no existen suficientes estudios ni mediciones que permitan tomar decisiones seguras respecto a la gestión que se realiza con los residuos. Además, el trabajo también permitió visibilizar que existe una baja organización y planificación de los sistemas actuales de gestión de residuos en las municipalidades, punto importante a destacar del trabajo, que si bien requiere más herramientas para obtener un modelo más complejo, permite enfocarse en la situación global del problema y centrarse en buscar o gestionar la manera de obtener aquella información relevante con la que no se cuenta.

# Conclusiones

A partir del trabajo realizado, fue posible obtener información respecto a la caracterización de los residuos generados por la comuna, y también sobre los puntos de distribución, tratamiento y disposición final de La Granja, pudiendo comprender la situación actual y el manejo de los residuos que tiene el municipio, generando así la representación gráfica y la solución actual de la comuna.

Por otro lado, entre de los envases de productos prioritarios, se seleccionó el plástico como foco de atención, principalmente por su aporte en el volumen total de los residuos generados por la comuna.

Con toda la información recopilada y la comprensión del funcionamiento de los residuos en la comuna, permitió generar la Superestructura del sistema, añadiendo nodos de posibles instalaciones que podrían ayudar a mejorar la situación actual de la comuna.

Respecto a los indicadores, se decide trabajar con los principales costos del problema, que corresponden a costos de operación y de inversión principalmente. Por otra parte, el segundo indicador cumple con respetar la jerarquización del manejo de residuos otorgando puntajes a los distintos tratamientos propuestos.

De esta manera, se logra formular y resolver el problema de optimización planteado, concluyendo que la aplicación de esta metodología depende en gran medida de aumentar la capacidad operativa del Centro de Acopio, tanto en la recepción de los residuos como en la gestión del retiro de ellos en la comuna. Además, existe otro punto a analizar, que corresponde al bajo costo que actualmente posee la disposición final en Chile en comparación con el tratamiento de los residuos que pueden ser reutilizados, reciclados o valorizados energéticamente.

Finalmente, en cuanto al objetivo principal del problema propuesto, es posible concluir que la formulación del problema sí entrega configuraciones óptimas del sistema. Estas soluciones permiten disminuir los impactos negativos de la comuna, esto se ve reflejado en que todas las soluciones presentadas proponen aumentar el tratamiento del flujo másico de residuo plástico. Considerando que en Chile se utiliza un poco más del 50% de la capacidad de las instalaciones de reciclaje plástico, es posible tratar un mayor flujo de residuo plástico, sin embargo, ¿será posible segregar y recolectar un mayor flujo de dicho material en la comuna?

De esta manera, queda propuesto mejorar el modelo iniciado, incluyendo la ruta de los camiones y datos reales respecto a los residuos generados. Todo esto con el fin de aplicar



metodologías similares a nivel regional y/o nacional, y así disminuir los flujos que se dirigen a los rellenos sanitarios.

# Glosario

## C

### CA

Es la abreviación asignada al conjunto de los Centros de Acopio de la comuna. Para este problema es sólo uno. 45, 50–52

### CDF

Abreviación asignada a los costos de disposición final en el relleno sanitario . 46, 59

### COCA

Abreviación asignada a los costos de operación del centro de acopio . 46, 59, 61

### COPT1

Abreviación asignada a los costos de operación de la planta de tratamiento mecánico . 46, 60

### COPT2

Abreviación asignada a los costos de operación de la planta de tratamiento de pirólisis . 46, 60

### COPT3

Abreviación asignada a los costos de operación de la planta de tratamiento de combustión . 46, 60

## E

### ET

Es la abreviación asignada al conjunto de la Estación de Transferencia, que para este problema es sólo una . 45, 51–53

## F

## **FR**

Es la abreviación asignada al conjunto de las franjas de la comuna . 34, 40, 41, 45, 51, 53, 57

## **P**

### **P1**

Es el conjunto de los tratamientos de reciclaje mecánico . 45

### **P2**

Es el conjunto de los tratamientos de reciclaje por pirólisis . 45

### **P3**

Es el conjunto de los tratamientos de reciclaje por combustión . 45

## **PL**

Es la abreviación asignada al conjunto de puntos limpios del problema. 45, 53

## **PLA**

Es la abreviación asignada al conjunto de los puntos limpios ya existentes en la comuna. 45, 50, 57

## **PLN**

Es la abreviación asignada al conjunto de puntos limpios nuevos propuestos en la comuna. 45, 50, 54

## **PT**

Es el conjunto de los tratamientos de reciclaje para los residuos plásticos . 45

## **PV**

Es la abreviación asignada al conjunto de puntos verdes existentes en la comuna. 20, 36, 41, 45, 52, 53

## **R**

## **RS**

Es el conjunto de los Rellenos Sanitarios, Qque para este problema es sólo uno . 45, 53

## **RSD**

Residuo sólido domiciliario. 16, 17, 22, 24, 25

# Bibliografía

- [1] SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO. 4. DIAGNOSTICO NACIONAL Y REGIONAL SOBRE GENERACION Y ELIMINACION DE RESIDUOS. En: SOLIDOS DOMICILIARIOS Y ASIMILABLES. 2017.
- [2] SESMA, GOBIERNO DE CHILE. Informacion General Relativa a Residuos Domiciliarios. 2001.
- [3] KDM. Preguntas Frecuentes, 2012 [en línea] <https://www.kdm.cl/preguntas-frecuentes.html#17> [consulta: 13 de Noviembre 2018].
- [4] MINISTERIO DE SALUD. Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios. Biblioteca Nacional del Congreso Nacional de Chile, 2005 [en línea] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=268137> [consulta: 1 de septiembre 2019].
- [5] FERNANDEZ, O. Identifican 73 vertederos ilegales en Santiago y la mitad son peligrosos. La Tercera, 2017 [en línea] <https://www.latercera.com/noticia/identifican-73-vertederos-ilegales-santiago-la-mitad-peligrosos/> [consulta: 13 de Noviembre 2018].
- [6] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Ley Marco para la Gestión de Residuos. En: Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. 2016.
- [7] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. ESTABLECE MARCO PARA LA GESTION DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE. Biblioteca Nacional del Congreso Nacional de Chile, 2016 [en línea] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090894> [consulta: 13 de Noviembre].
- [8] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. . Ley de fomento al Reciclaje., [en línea] <http://portal.mma.gob.cl/residuos/ley-de-fomento-al-reciclaje/> [consulta: 13 de Noviembre 2018].
- [9] ROJAS, J., RUZ, S. IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA DE CARACTERIZACION Y CLASIFICACION DE RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARIOS PARA LA COMUNA DE LA GRANJA. En: Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. UNIVERSIDAD DE

SANTIAGO DE CHILE, FACULTAD DE INGENIERIA, 2018.

- [10] SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE. Programa exitoso de reciclaje en comuna de La Granja., 2017. [en línea] <http://santiagorecicla.promoplan.cl/programa-exitoso-de-reciclaje-en-comuna-de-la-granja/> [consulta: 13 de Noviembre 2018].
- [11] SANTIAGO RECICLA. Mapa Chile con puntos verdes y limpios. Santiago Recicla, 2019 [en línea] <http://www.santiagorecicla.cl/mapa/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [12] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Informe Final del Proceso de Certificación Ambiental Municipal Nivel Básico. Municipalidad de La Granja, 2017 [en línea] <https://www.municipalidadlagranja.cl/wp-content/uploads/2018/08/CERTIFICACIÓN.pdf> [consulta: 24 de junio 2019].
- [13] MUNICIPALIDAD DE LA GRANJA, DIRECCIÓN DE MEDIO AMBIENTE ASEO Y ORNATO. Plan de gestión para el manejo de residuos sólidos, comuna de La Granja., 2019.
- [14] MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL. Metodología de formulación y evaluación socioeconómica de proyectos de valorización de residuos municipales. 2013.
- [15] SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE. Santiago Recicla. Mapa., 2018. [en línea] <http://www.santiagorecicla.cl/mapa/> [consulta: 25 de Diciembre 2018].
- [16] RIOS C., A. CATALOGO DE EMPRESAS DE VALORIZACION DE RESIDUOS. 2018.
- [17] DIAZ, F., RIFFO, J. Sustainable and Resilient Water Networks: A Process Systems Approach for Climate Change Adaptation. 2017.
- [18] BIEGLER, L., GROSSMANN, I., WESTERBERG, A. Systematic Methods of Chemical Process Design. 1998.
- [19] CHANG, N.B., PIRES, A. Sustainable Solid Waste Management. Wiley, 2015.
- [20] VASQUEZ, O. Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en Región Metropolitana de Chile, 2005. Santiago, Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [21] MARDOFF R., M. Estudio de la gestión de residuos sólidos urbanos del gran Santiago., 2016. Memoria de Ingeniero Civil Industrial. Santiago, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Industrias.
- [22] AYLWIN, C. Evaluación de un plan de gestión de Residuos Sólidos Domiciliarios en la comuna de Cochamó, Ingeniería Conceptual. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil Química y Biotecnología, 2017.
- [23] DIAZ, F., RIFFO, J. Progress report: Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation. 2018.

- [24] VALENZUELA-VENEGAS, G., HENRÍQUEZ-HENRÍQUEZ, F., BOIX, M., MONTASTRUC, L., ARENAS-ARAYA, F., MIRANDA-PÉREZ, J., DÍAZ-ALVARADO, F.A. A resilience indicator for Eco-Industrial Parks. Journal of cleaner production, 174: 807–820, 2018.
- [25] GAMS.  
An Introduction to GAMS, [en línea] <https://www.gams.com/products/introduction/> [consulta: 10 de Diciembre 2018].
- [26] SAHINIDIS, N. BARON. GAMS, 2015. [en línea] [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_BARON.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_BARON.html) [consulta: 24 de Diciembre 2018].
- [27] CUARTAS TORRES, B.A., ET AL. Metodología para la optimización de múltiples objetivos basada en ag y uso de preferencias. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia.
- [28] ABDUL-RAHMAN, F., WRIGHT, S.E. Reduce, reuse, recycle: alternatives for waste management. NM State University, Cooperative Extension Service, 2014.
- [29] PAÍS CIRCULAR. ¿Cómo es la infraestructura del reciclaje en Chile? paiscircular.cl, 2019 [en línea] <https://www.paiscircular.cl/consumo-y-produccion/como-es-la-infraestructura-del-reciclaje-en-chile/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [30] ASOCIACIÓN GREMIAL DE INDUSTRIALES DEL PLÁSTICO (ASIPLA). Estudio sobre reciclaje de plástico en Chile. ASIPLA, 2019 [en línea] <http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2019/04/190328-Estudio-sobre-Reciclaje-de-Plásticos-en-Chile-Resumen-Ejecutivo.pdf> [consulta: 24 de junio 2019].
- [31] RAGAERT, K., DELVA, L., VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management, 69: 24–58, 2017.
- [32] MOCKLER M., K. Implementing Plastic Pyrolysis Into Chile’s Plastic Recycling Infrastructure., 2018. Baccalaureate of Arts in International Studies in Chemical Engineering. Oregon, Oregon State University.
- [33] GREENPLAST. ¿En qué consiste nuestro proceso de reciclaje? Greenplast, [en línea] <http://www.greenplast.cl/#que-hacemos> [consulta: 24 de junio 2019].
- [34] GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, D.O.E., CONSERVATION. Waste Technologies: Waste to Energy Facilities. WSP, United by our difference, 2013.
- [35] SELVA, C. Pre-feasibility study of a waste-to-energy plant in Santiago, Chile., 2017. Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University.
- [36] ASTRUP, T.F., TONINI, D., TURCONI, R., BOLDRIN, A. Life cycle assessment of thermal waste-to-energy technologies: review and recommendations. Waste management, 37: 104–115, 2015.

- [37] ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE MAIPÚ. Gestión de Residuos Sólidos Domiciliarios de Maipú. Centro de Investigación Periodística (CIPER) Chile, 2016. [en línea] <https://ciperchile.cl/wp-content/uploads/Presentacion-Basura-Maipu.pdf> [consulta: 24 de junio 2019].
- [38] OBRADOR, P. Lanzan plan "Santiago Recicla": Construirán 24 nuevos puntos limpios en 18 comunas., 2017. [en línea] <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2017/08/23/lanzan-plan-santiago-recicla-construiran-24-nuevos-puntos-limpios-en-18-comunas.shtml> [consulta: 24 de junio 2019].
- [39] RUBIO-CASTRO, E., PONCE-ORTEGA, J.M., SERNA-GONZÁLEZ, M., EL-HALWAGI, M.M. Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park. *Computers & Chemical Engineering*, 44: 58–83, 2012.
- [40] SEREMI MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Informe Rellenos Sanitarios - Residuos Sólidos Urbanos en la RMS. 2017, [en línea] <http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2019/04/Informe-Rellenos-Sanitarios-2017-VF.pdf> [consulta: 24 de junio 2019].
- [41] OKUWAKI, A. Feedstock recycling of plastics in Japan. *Polymer Degradation and Stability*, 85(3): 981–988, 2004.
- [42] KIDD, D. A Quiet Revolution in Trash Trucks. GOVERNING, THE STATE AND LOCALITIES, 2014 [en línea] <https://www.governing.com/topics/transportation-infrastructure/gov-to-save-on-trash-trucks-cities-take-a-look-at-the-gas-tank.html> [consulta: 24 de junio 2019].
- [43] SANDHU, G.S., FREY, H.C., BARTELT-HUNT, S., JONES, E. In-use activity, fuel use, and emissions of heavy-duty diesel roll-off refuse trucks. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(3): 306–323, 2015.
- [44] MINISTERIO DE ENERGÍA. Portal de indicadores de consumo energético y emisiones vehiculares. Ministerio de Energía, 2019 [en línea] <http://www.consumovehicular.cl/inicio#/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [45] GUTIÉRREZ, J.I. Este es el ranking final de los autos más vendidos en Chile en 2018. La Tercera, 2019 [en línea] <https://www.latercera.com/mtonline/noticia/autos-mas-vendidos-2018/521478/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [46] SAFT, R.J. Life cycle assessment of a pyrolysis/gasification plant for hazardous paint waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(4): 230, 2007.
- [47] AZAPAGIC, A. Energy from municipal solid waste: large-scale incineration or small-scale pyrolysis? *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 6(5), 2007.
- [48] MUÑOZ PATILLO, V. El negocio de la basura: hasta \$700 se paga por kilo para reciclaje. Economía y Negocios, El Mercurio, 2007 [en línea] <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=30849> [consulta: 24 de junio 2019].



- [49] CELIS, C. El valor de la basura. La Tercera, 2010 [en línea] <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=30849> [consulta: 24 de junio 2019].
- [50] CASSINELLI, F. Chilenos gastamos en promedio 170 litros de agua al día: Entérate de cuánto podrías ahorrar con esta calculadora. 24 horas data, 2019 [en línea] <https://www.24horas.cl/data/chilenos-gastamos-en-promedio-170-litros-de-agua-al-dia-enterate-de-cuanto-podrias-ahorrar-con-esta-calculadora-3134373> [consulta: 24 de junio 2019].
- [51] GOBIERNO DE CHILE. Cuidemos el agua: Cifras y recomendaciones. Gobierno de Chile, 2015 [en línea] <https://www.gob.cl/noticias/cuidemos-el-agua-cifras-y-recomendaciones/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [52] GERENTE GENERAL. Tarifas Vigentes. Aguas Andinas, 2018 [en línea] [https://www.aguasandinas.cl/documents/20450/52092/Tarifas + Aguas + Andinas + Vigentes/38a4b95f - 4284 - 773d - d125 - c133e7a3f4f9?version = 1,1](https://www.aguasandinas.cl/documents/20450/52092/Tarifas+Aguas+Andinas+Vigentes/38a4b95f-4284-773d-d125-c133e7a3f4f9?version=1,1) [consulta: 24 de junio 2019].
- [53] FORNO, M. Ranking de comunas que más gastan energía eléctrica en el hogar: busque la suya. Las Últimas Noticias, 2019 [en línea] <https://www.gob.cl/noticias/cuidemos-el-agua-cifras-y-recomendaciones/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [54] EMPRESAS ELÉCTRICAS A.G. Tarifas en Distribución. Empresas Eléctricas A.G., 2018 [en línea] <https://www.electricas.cl/temas-estrategicos/cuentas-simples-y-claras/> [consulta: 24 de junio 2019].
- [55] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS. Valores y fechas. Servicio de Impuestos Internos, [en línea] [http://www.sii.cl/valores\\_y\\_fechas/index\\_valores\\_y\\_fechas.html](http://www.sii.cl/valores_y_fechas/index_valores_y_fechas.html) [consulta: 24 de junio 2019].
- [56] KHURSHID, M.B., IRFAN, M., LABI, S. Comparison of methods for evaluating pavement interventions: evaluation and case study. Transportation Research Record, 2108(1): 25–36, 2009.
- [57] VALDEAVELLANO NAVARRO, P.A. Instalación de una planta de pirólisis para la valorización de neumáticos fuera de uso para la empresa Reinvent. Universidad de Chile, 2013.
- [58] RÍOS, P. Proyecto de biocombustible: planta de pirólisis. Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2011.
- [59] CHENGLI SPECIAL AUTOMOBILE CO., LTD. 19 Foton m3 camión compactador de basura. Alibaba.com, 2019 [en línea] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/foton-19-m3-garbage-compactator-truck-60364815295.html> [consulta: 24 de junio 2019].
- [60] BRISA. Residuos Orgánicos. brisa, ingeniería construcción ambiental, 2016 [en línea] <http://www.brisa.cl/residuos-organicos/+&cd=2&hl=en&ct=clnk&gl=cl> [consulta: 24 de junio 2019].

- [61] CHEVROLET. Especificaciones técnicas NPR816. chevrolet.cl, 2018 [en línea] <https://www.chevrolet.cl/content/dam/chevrolet/south-america/chile/espanol/index/vans-and-commercial/2018-npr-816/mov/02-pdfs/ficha-npr-816-mayo.pdf> [consulta: 24 de junio 2019].

# Anexos

# Anexo A

## Situación actual de la comuna y su representación gráfica

### A.1. Residuos sólidos domiciliarios en La Granja

A continuación, en la Tabla A.1 se presentan los datos mensuales y anuales de generación de residuos en la comuna, comprendiendo desde el año 2008 al 2018.

Tabla A.1: Residuos sólidos Domiciliarios producidos por año, expresados en kilogramo. [13]

MES/AÑO	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	5.142	4.721	4.588	5.079	5.023	5.605	5.576	5.656	5.638	6.348	6.354
Febrero	4.365	3.983	3.997	4.170	4.672	4.215	4.623	4.877	5.138	5.102	5.276
Marzo	4.849	4.353	5.030	4.700	4.919	5.308	5.548	5.832	6.124	5.737	6.250
Abril	4.507	3.946	4.192	4.275	4.198	5.369	4.912	4.993	5.628	5.238	5.932
Mayo	4.639	4.090	4.363	4.320	4.156	5.178	4.944	4.908	5.515	5.221	5.694
Junio	4.130	3.684	4.027	3.892	4.156	4.476	4.540	4.918	5.063	4.869	5.092
Julio	4.378	3.769	3.703	4.074	4.226	4.600	4.690	4.958	4.861	5.035	5.197
Agosto	4.329	3.886	3.899	4.321	4.021	4.974	4.761	4.974	5.595	5.411	5.227
Septiembre	4.639	4.043	4.136	4.525	4.184	4.705	5.056	5.132	5.410	5.203	5.009
Octubre	4.596	4.499	4.446	4.741	4.886	5.199	5.435	5.563	5.688	6.051	5.868
Noviembre	4.019	4.184	4.485	4.597	4.811	5.283	5.109	5.564	5.829	5.924	5.706
Diciembre	4.767	4.979	4.741	5.121	5.116	5.690	5.667	6.352	6.785	6.285	6.143
<b>TOTAL ANUAL</b>	54.360	50.137	51.607	53.815	54.368	60.602	60.861	63.727	67.274	66.424	67.748

# Anexo B

## Modelo gráfico de la situación actual

### B.1. Esquema modelo actual

En la Figura B.1 se presentan todas las conexiones existentes entre los elementos del sistema actual. Aquí no se presentan los nuevos conjuntos propuestos para el problema.

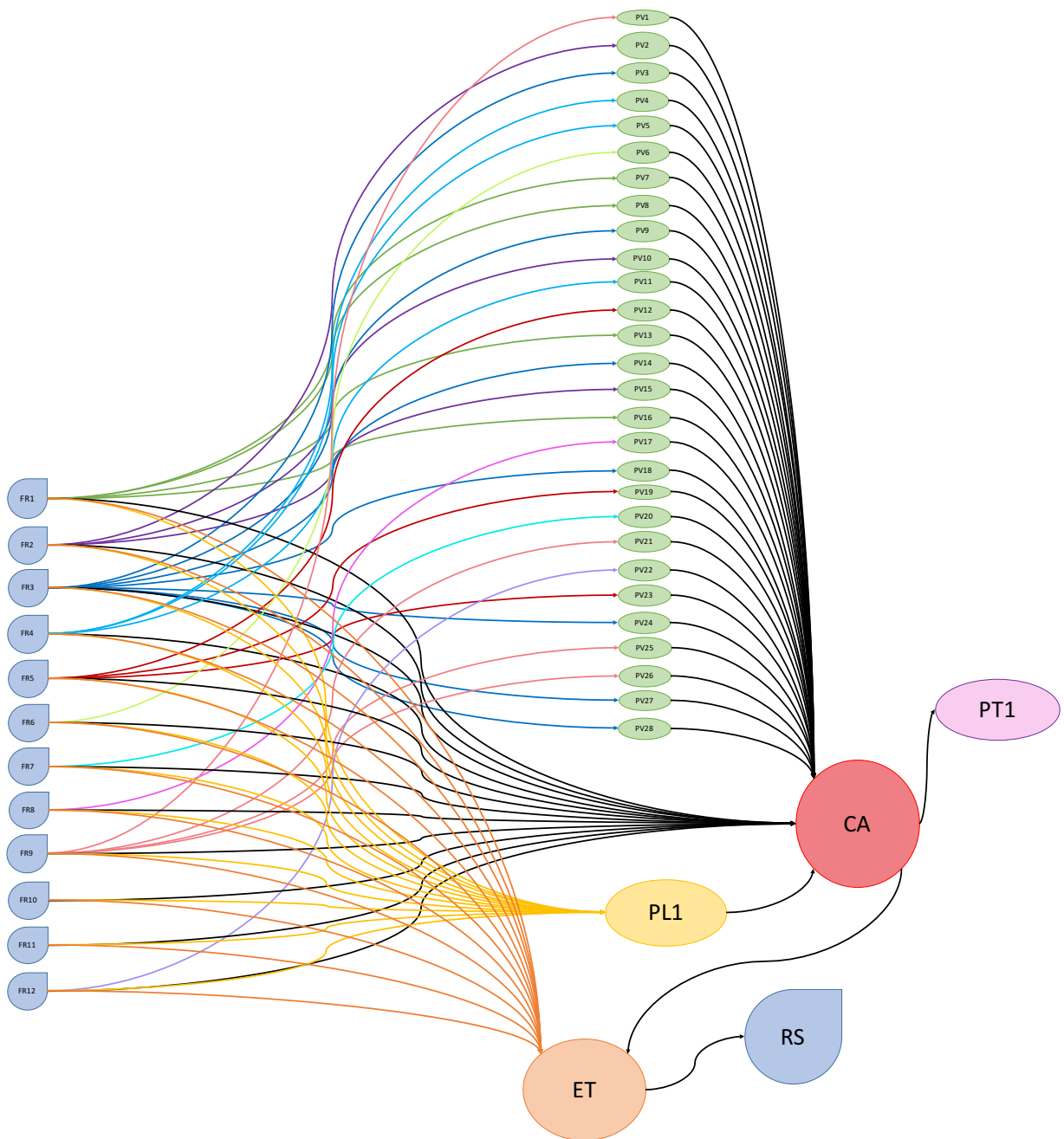


Figura B.1: Representación gráfica de la solución actual. Se muestran todas las conexiones existentes entre los elementos del sistema. (Elaboración propia, con la colaboración de la información entregada por la Municipalidad)

## B.2. Balance de Masa

Para poder definir toda la materia que participa en el sistema, es necesario realizar balances de masa de residuo plástico.

### B.2.1. Metodología

- a. Separar el esquema en matrices de conexión, es decir, realizar sub esquemas que consideren cada uno de los conjuntos y sus destinos. Con esta información, confeccionar los dibujos correspondientes a cada matriz.
- b. Una vez separado el esquema, es importante escribir las ecuaciones de balance de masa que representan cada una de las matrices, con el fin de determinar qué flujos poseen un valor conocido y cuáles faltan.
- c. Calcular los flujos faltantes, en esta etapa es útil hacer uso de herramientas como Excel, para poder realizar los cálculos de las distintas matrices.
- d. Paralelo a la resolución de los balances, es importante listar los supuestos utilizados para la resolución del problema.
- e. Finalmente, para verificar los cálculos, se debe realizar el balance de masa global.

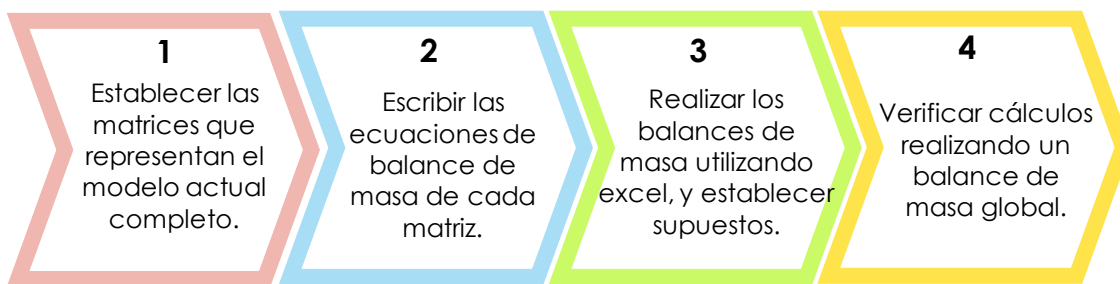


Figura B.2: Esquema de trabajo para realizar el balance de masa del modelo actual.

### B.2.2. Matriz 1

La primera sección en la que se realiza el balance corresponde a las franjas y sus puntos de destino: PV, PLA, CA y ET. La representación gráfica de este esquema se presenta en la Figura B.3.

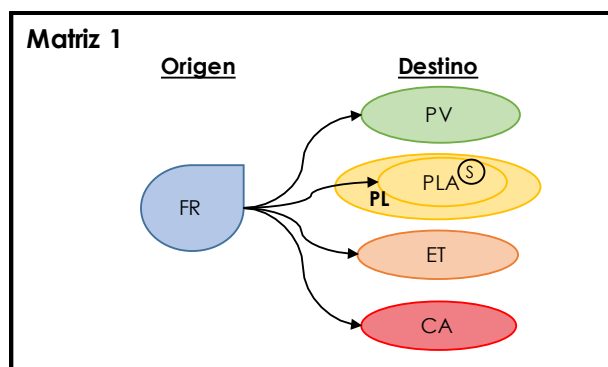


Figura B.3: Esquema balance de masa de las franjas a sus destinos. (Elaboración propia)

Para la confección de la matriz que se presenta en la Tabla B.1, se deben realizar distintos análisis y cálculos. El balance que se debe cumplir es el que se muestra en la ecuación B.1, el que indica que para toda franja perteneciente a FR, la suma de todos los flujos de dicha franja debe ser igual a la generación de residuos plásticos de la misma.

$$\forall n \in FR, \quad F1_{FR \rightarrow PLA} + \sum_m F3_{FR \rightarrow PV} + F4_{FR \rightarrow CA} + F5_{FR \rightarrow ET} = F_n \quad (B.1)$$

Los supuestos considerados para el balance entre FR y PLA, son los que se indican a continuación:

- La capacidad del punto limpio que posee la comuna es el doble de la capacidad de los puntos verdes.
- El PL1 se llena a fin de mes.
- Se asume que todas las franjas aportan equitativamente en el llenado del PL1.

Los supuestos que se consideran para realizar este balance entre FR y PV, son los siguientes:

- En primer lugar, se debe considerar la ubicación de los puntos verde, de esta manera, el supuesto tomado para este caso es que los habitantes pertenecientes a una franja de FR, prefieren depositar su material reciclado en los PV que se ubican dentro de su misma franja.
- Otro supuesto a considerar es que 1 de las 4 sacas de  $1,1 \text{ [m}^3\text{]}$  que posee cada punto verde, es exclusivamente para plásticos.
- Los puntos verde se llenan por lo menos 1 vez al mes. Respecto a la información de la municipalidad, no se realizan retiros con una frecuencia establecida, sin embargo, se asumirá que los PV se llenan a fin de mes.
- Los PV se llenan con los residuos que llevan los habitantes de la misma franja.



Tabla B.1: Matriz para determinar el balance de masa entre las Franjas y PV, PL1, CA0 y ET0. (Elaboración propia)

Destino ← Franja	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12	Total[kg/mes]
PV1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	44,00
PV2	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV3	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV4	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV5	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV7	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV8	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV9	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV10	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV11	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV12	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV13	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV14	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV15	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV16	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV18	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV19	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	44,00
PV22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	44,00
PV23	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV24	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	44,00
PV26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	44,00
PV27	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PV28	0,00	0,00	<b>44,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,00
PL1	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	88,00
CA0	76,72	77,37	61,89	61,89	64,47	64,47	48,03	47,71	29,34	30,30	41,59	41,26	645,06
ET0	27.127,35	27.355,32	21.884,25	21.884,25	22.796,10	22.796,10	16.983,09	16.869,11	10.372,22	10.714,17	14.703,48	14.589,50	228.074,94
Total [kg/mes]	27.346,11	27.541,07	22.202,01	22.070,01	22.981,85	22.915,85	17.102,85	16.988,87	10.590,98	10.800,92	14.790,24	14.709,26	230.040,00

Para determinar los valores de FR a CA y FR a ET, es necesario realizar el balance de masa de otras matrices. Además, considerando el balance de masa global que se presenta en la ecuación B.2, se extrae que falta determinar F9 y F10 para poder obtener los valores de F4 y F5.

$$\sum_n F1_{FR \rightarrow PLA} + \sum_n \sum_m F3_{FR \rightarrow PV} + \sum_n F4_{FR \rightarrow CA} + \sum_n F5_{FR \rightarrow ET} = F10_{CA \rightarrow PT01} + F9_{ET \rightarrow RS} \quad (B.2)$$

### B.2.3. Matriz 2

Esta matriz corresponde al balance realizado en los puntos verdes, en los cuales sabemos que existen distintas entradas de flujo desde las franjas, y que existen sólo un destino que corresponde al CA.

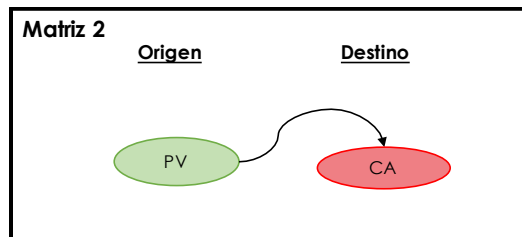


Figura B.4: Esquema balance de masa en los puntos verdes. (Elaboración propia)

El balance de masa sobre un punto verde  $m$  perteneciente a PV, se ve expresado en la ecuación B.3, la cual indica que todo lo que entra a un determinado punto verde es lo mismo que va de dicho PV al CA.

$$\forall m \in PV, \sum_n F3_{FR \rightarrow PV} = F13_{PV \rightarrow CA} \quad (\text{B.3})$$

En la Tabla B.1 se indican los flujos de entrada a los distintos puntos verdes, es por eso que según la ecuación B.3, necesariamente los flujos de salida al CA tienen los valores que se presentan en la Tabla B.2.

Tabla B.2: Matriz para determinar el balance de masa entre los elementos de PV y el CA. (Elaboración propia)

PV → CA	CA0	Total [kg/mes]
PV1	44,00	44,00
PV2	44,00	44,00
PV3	44,00	44,00
PV4	44,00	44,00
PV5	44,00	44,00
PV6	44,00	44,00
PV7	44,00	44,00
PV8	44,00	44,00
PV9	44,00	44,00
PV10	44,00	44,00
PV11	44,00	44,00
PV12	44,00	44,00
PV13	44,00	44,00
PV14	44,00	44,00
PV15	44,00	44,00
PV16	44,00	44,00
PV17	44,00	44,00
PV18	44,00	44,00
PV19	44,00	44,00
PV20	44,00	44,00
PV21	44,00	44,00
PV22	44,00	44,00
PV23	44,00	44,00
PV24	44,00	44,00
PV25	44,00	44,00
PV26	44,00	44,00
PV27	44,00	44,00
PV28	44,00	44,00
<b>Total [kg/mes]</b>	1.232,00	<b>1.232,00</b>

### B.2.4. Matriz 3

Esta matriz corresponde al balance realizado entre PLA y CA. A diferencia de los casos anteriores, aquí sólo se presenta un único flujo que va desde el punto limpio al centro de acopio. La representación gráfica de este balance se observa en la Figura B.5.

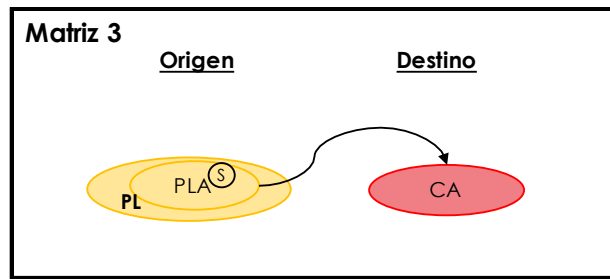


Figura B.5: Esquema balance de masa en PLA. (Elaboración propia)

La ecuación B.4 manifiesta que la sumatoria de todos los flujos que van desde las franjas a PL1 debe ser igual al único flujo que sale hacia el centro de acopio.

$$\sum_n F1_{FR \rightarrow PLA} = F6_{PLA \rightarrow CA} \quad (B.4)$$

A partir de la Tabla B.1 se conocen los valores de los flujos de entrada a PL1, y como indica su balance en la ecuación B.4, la sumatoria de todos esos flujos corresponde al flujo de salida desde PL1. Lo mencionado queda expresado en la Tabla B.3.

Tabla B.3: Matriz para determinar el balance de masa entre PL1 y CA. (Elaboración propia)

PL → CA	CA0	Total [kg/mes]
PL1	88,00	88,00
Total [kg/mes]	88,00	

### B.2.5. Matriz 4

En esta matriz se representa el balance de masa en CA, en particular para poder estimar los flujos de salida hacia ET y PT01, como se representa en la Figura B.6.

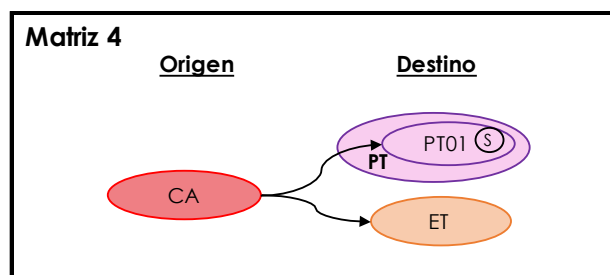


Figura B.6: Esquema balance de masa en CA. (Elaboración propia)

En la ecuación B.5, queda representado matemáticamente el balance que ocurre en CA. En este caso sólo son conocidos F13 y F6, aún no se determinan los flujos F4, F10 ni F11.

$$\sum_n F4_{FR \rightarrow CA} + \sum_m F13_{PV \rightarrow CA} + F6_{PLA \rightarrow CA} = F10_{CA \rightarrow PT01} + F8_{CA \rightarrow ET} \quad (B.5)$$

Para determinar F10, se tiene conocimiento de los residuos que fueron recuperados durante el año 2018, las toneladas recuperadas por tipo de residuo aparecen en la Tabla B.4. A partir de aquí, se sabe que 21,44 toneladas de plástico fueron recuperadas (sumando PET y PEAD). De esta manera, se toman los siguientes supuestos:

- Se recuperó la misma cantidad de plástico durante cada mes del año 2018, es decir, las toneladas recuperadas se dividen en 12 para saber cuánto se recuperó en 1 mes.
- Se consideran 230,04 toneladas de plástico generadas al mes, según la caracterización de residuos realizada por la municipalidad (Tabla 2.1).
- Se asume que las toneladas recuperadas corresponden a una parte de las toneladas consideradas en el punto anterior.
- De acuerdo a información entregada por la municipalidad, se asume que F8 posee un valor equivalente al 10 % de las toneladas de F10.

Tabla B.4: Toneladas recuperadas por tipo de residuo durante el año 2018.

Nº	Tipo de residuo	Masa [ton/año]	%
1	Cartón	61,19	29,1
2	Cartón Dúplex	6,37	3,0
3	Metales	16,76	8,0
4	Latas	1,32	0,6
5	Papel B2	9,54	4,5
6	Papel Diario	6,63	3,1
7	Papel Mixto	11,33	5,4
8	Plástico PET	18,83	8,9
9	Plástico PEAD	2,61	1,2
10	Tetra Pack	4,62	2,2
11	Vidrio	71,20	33,8
<b>Total</b>		210	100,0

Tomando en cuenta todo lo indicado, se obtiene que el valor de F10 es 1.786 [kg/mes] y el de F8 es 179 [kg/mes], como se presenta en la Tabla B.5. Por otra parte, para encontrar los valores de los flujos que faltan por determinar en la Tabla B.1, primero es necesario realizar el cálculo que se presenta en la ecuación B.6, para poder obtener la sumatoria de todos los flujos que se dirigen desde FR a CA.

$$\sum_n F4_{FR \rightarrow CA} = F10_{CA \rightarrow PT01} + F8_{CA \rightarrow ET} - F6_{PLA \rightarrow CA} - \sum_m F13_{PV \rightarrow CA} \quad (B.6)$$

Para poder obtener el valor específico de cada uno de los flujos que salen desde las franjas, se requiere realizar el cálculo propuesto en la ecuación B.7, multiplicando proporcionalmente por la fracción de habitantes que viven por franja.

$$\forall n \in FR, \quad F4_{FR \rightarrow CA} = \frac{\sum_n F4_{FR \rightarrow CA}}{Población\ Total\ Calculada} \cdot [Habitantes_n] \quad (B.7)$$

Tabla B.5: Matriz para determinar el balance de masa entre CA hacia sus destinos ET y PT01. (Elaboración propia)

Destino ← CA	CA0	Total [kg/mes]
PT01	1.786,00	1.786,00
ET0	179,00	893,00
Total [kg/mes]	2.680	

### B.2.6. Matriz 5

Finalmente, falta realizar el balance en ET para cerrar el sistema. Aquí se considera un único flujo que se dirige desde ET a RS, la representación de este balance se observa en la Figura B.7.

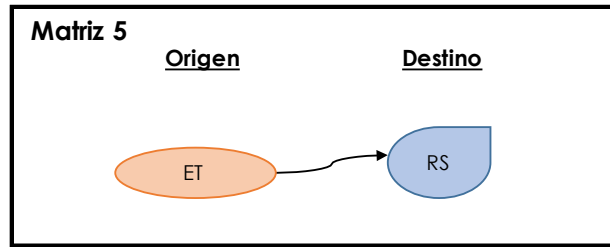


Figura B.7: Esquema balance de masa en ET. (Elaboración propia)

Al igual que en el caso de la matriz anterior, es necesario determinar el valor de la sumatoria de todos los flujos que van de FR a ET. Para ello es necesario tener en cuenta el balance de masa planteado en la ecuación B.8, de donde se despeja el flujo de interés como se presenta en la ecuación B.9, considerando que  $F9$  es igual a 228,3 toneladas por mes (aproximadamente), según la información entregada por parte de la municipalidad.

$$\sum_n F5_{FR \rightarrow ET} + F8_{CA \rightarrow ET} = F9_{ET \rightarrow RS} \quad (B.8)$$

$$\sum_n F5_{FR \rightarrow ET} = F9_{ET \rightarrow RS} - F8_{CA \rightarrow ET} \quad (B.9)$$

También se debe multiplicar por el porcentaje de habitantes pertenecientes a la franja correspondiente para poder obtener cada uno de los flujos que se dirigen de FR a ET, como se muestra en la ecuación B.10.

$$\forall n \in FR, \quad F5_{FR \rightarrow ET} = \frac{\sum_n F5_{FR \rightarrow ET}}{Población\ Total\ Calculada} \cdot [Habitantes_n] \quad (B.10)$$

A partir de la información obtenida, es posible completar la matriz mostrada en la Tabla B.6.

Tabla B.6: Matriz para determinar el balance de masa entre ET y RS. (Elaboración propia)

ET → RS	RS0	Total [kg/mes]
ET0	228.254,00	228.254,00
<b>Total [kg/mes]</b>	228.254,00	

Para verificar el balance de masa completo, es necesario verificar el balance de masa global, como se presentó en la ecuación 7.1. Sumando los flujos correspondientes, se obtiene que los valores de entrada y salida son iguales, como expresa el esquema de la Figura B.8.

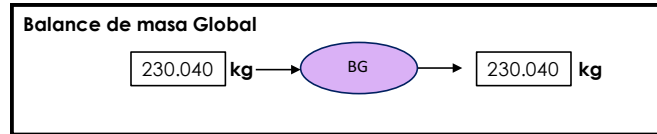


Figura B.8: Resumen balance de masa global. (Elaboración propia)

### B.2.7. Discusiones respecto al balance de masa

En cuanto al balance de masa, respecto a los supuestos tomados en la *Matriz 1*:

- La capacidad del punto limpio es de 8  $[m^3]$ , y además, recibe sólo 4 tipos de residuos (papeles y cartón, vidrios, metales y plásticos), no así como lo indica la página de Santiago Recicla [11]. Todo lo mencionado es información entregada por la Municipalidad.
- Asumir que el punto limpio se llena a fin de mes, no está tan alejado de la realidad como lo indican los encargados del Centro de Acopio, sin embargo, el llenado de los puntos de almacenamiento es relativo, podrían llenarse una o más veces al mes, o podrían no hacerlo. Este punto también depende de las fechas y celebraciones que se lleven en el año, pero no existen registros de los días en que se han hecho retiros en ese punto.
- Finalmente, asumir que todas las franjas aportan de igual manera, tiene que ver con que sólo existe uno en toda la comuna, pero se debe tener en cuenta que tomar este supuesto altera el valor de las toneladas totales producidas por franja. Tomando como referente la franja que menos residuos produce, el 1% corresponde 106 [kg] y los que se aportan por el punto limpio corresponden a 7 [kg], es decir es un aporte por debajo del 1%.
- Se asume que las personas se dirigen a los puntos verde ubicados dentro de la misma franja, sin embargo, eso no significa que todos los puntos verde sean los más cercanos

a los que se puedan dirigir. Observando la matriz de la Tabla B.1, la que más envía a puntos verde es FR3, que envía 308 [kg], que corresponde al 1,4% aproximadamente del total de kilogramos producidos por dicha franja. De esta manera, el aporte y el supuesto tomado no afecta de manera considerable el total producido por las franjas.

- Según la información entregada por el centro de acopio, se entregan 4 sacas a cada uno de los puntos verde, con el fin de que llenen con los 4 tipos de residuos principales: plástico, vidrios, metales y papeles y cartones. A pesar de que este es el fin, no se puede asegurar que las sacas vengan como se solicita, es probable que los residuos estén combinados o que se llene más de una saca con un tipo de residuo. Se debe considerar nuevamente que el plástico ocupa mucho volumen, y si no es aplastado se puede pensar que podría llenar fácilmente más de una saca.
- Respecto al llenado de sacas en los PV, también es relativo y la municipalidad no tiene registro de lo que ocurre. Existen puntos verde que poseen más o menos sacas, y el llenado de ellas tampoco posee un registro.

Tanto para los cálculos realizados en la *Matriz 2* y *Matriz 3*, se asume que no existen pérdidas de plástico en el traslado hacia el centro de acopio.

# Anexo C

## Formulación del problema de optimización

A continuación se presentarán los cálculos y resultados obtenidos para distintos parámetros presentados en el desarrollo de este trabajo.

### C.1. Costos de operación

#### C.1.1. Costos operacionales del Centro de Acopio

Para los costos operacionales del Centro de Acopio se considerarán aquellos presentados en la Tabla C.1, que corresponden principalmente a los costos de operación de la cinta transportadora y de las oficinas de trabajo que se encuentran en el lugar.

Tabla C.1: Tabla de gastos operacionales mensuales en el Centro de Acopio (incompleta). (Elaboración propia, con colaboración de datos entregados por la Municipalidad de La Granja)

Item	Descripción	Valor	Unidad
1	Sueldos	?	\$CLP/mes
2	Agua	?	\$CLP/mes
3	Electricidad	?	\$CLP/mes
4	Cinta transportadora	?	\$CLP/mes

En el caso de los sueldos, se considera que los operarios reciben un sueldo entre CLP\$350.000 y CLP\$400.000, si en promedio 4 personas se encargan del funcionamiento de la cinta transportadora, el valor total en sueldos para la segregación de los residuos es de CLP\$1.600.000 (datos entregados por el Municipio). Para el funcionamiento de todo el Centro de Acopio, el monto destinado es de CLP\$7.000.000 de pesos aproximadamente para 16 a 20 personas que trabajan ahí. Aquí no se consideró todo ya que los costos de tratamiento por



tonelada serían muy elevados, considerando que sólo se realiza la segregación de los residuos comparado al caso de otros tratamientos.

Concretamente, si se consideran todos los sueldos, y se asume que se tratan 20 toneladas mensuales aproximadamente (dato de la Municipalidad), el costo por tonelada tratada es de CLP\$360.000 por tonelada de residuo, aproximadamente. Por otro lado, si se asume que todo lo que tratan son metales, recibirían CLP\$700 por kilo de residuo tratado, que se traduce en recibir CLP\$700.000 por tonelada [48], en el peor de los casos, el vidrio se vende a CLP\$30 por kilo, recibirían CLP\$30.000 por tonelada [49].

Respecto a los gastos en agua, se tiene que el consumo promedio por persona al mes en Chile es de  $4 \left[ \frac{m^3}{mes} \right]$  [50] [51]. Además, el valor por  $m^3$  es de CLP\$288,55 [52]. Si se toman 16 personas como referencia en el Centro de Acopio, el valor total es de:

$$Agua = 4 \left[ \frac{m^3}{mes} \right] \cdot 288,55 \left[ \frac{CLP\$}{m^3} \right] \cdot 16$$

$$Agua = 23.084,00 \left[ \frac{CLP\$}{mes} \right]$$

En el caso del gasto en electricidad sin considerar la cinta transportadora, el análisis es similar, el consumo promedio de energía por persona en Chile es de  $58,79 \left[ \frac{kWh}{mes} \right]$  [53] y el valor es de  $112,56 \left[ \frac{CLP\$}{kWh} \right]$  [54]. En este caso, se considera el consumo de 5 personas, ya que son 4 las que trabajan en el computador durante toda la jornada laboral y se agrega una extra por posibles consumos anexos generados por los otros operarios que no trabajan con aparatos eléctricos. De esta manera, el cálculo es el siguiente

$$Electricidad = 58,79 \left[ \frac{kWh}{mes} \right] \cdot 112,56 \left[ \frac{CLP\$}{kWh} \right] \cdot 5$$

$$Electricidad = 33.085,71 \left[ \frac{CLP\$}{mes} \right]$$

Finalmente, para el costo eléctrico por el uso de la cinta transportadora, considera los datos que se expresan en la Tabla C.2, ya que utiliza dos motores para funcionar. Los consumos que se expresan en la tabla fueron entregados por el Centro de Acopio.

Tabla C.2: Datos energía utilizada por cinta transportadora. (Entregados por Municipalidad)

<b>Motor</b>	<b>kW</b>	<b>Horas al día</b>	<b>Días uso</b>	<b>Semanas</b>	<b>Valor al mes [kWh/mes]</b>
Motor 1	1,8	4	5	4	144
Motor 2	1,5	4	5	4	120
<b>Total</b>					264

De esta manera, el costo eléctrico por la cinta transportadora es:

$$\text{Cinta transportadora} = 264 \left[ \frac{kWh}{mes} \right] \cdot 112,56 \left[ \frac{CLP\$}{kWh} \right]$$

$$\text{Cinta transportadora} = 29.714,67 \left[ \frac{CLP\$}{mes} \right]$$

Es así como la Tabla C.1 completada con los valores obtenidos, queda como se presenta en la Tabla C.3.

Tabla C.3: Tabla de gastos operacionales mensuales en el Centro de Acopio (completa). (Elaboración propia, con colaboración de datos entregados por la Municipalidad de La Granja)

Item	Descripción	Valor	Unidad
1	Sueldos	1.600.000,00	\$CLP/mes
2	Agua	23.084,00	\$CLP/mes
3	Electricidad	33.085,71	\$CLP/mes
4	Cinta transportadora	29.714,67	\$CLP/mes

Finalmente, para calcular el costo por tonelada tratada se suman todos los costos de la tabla y se dividen por la cantidad de toneladas ideales a tratar, correspondientes a 286 toneladas por mes, y no por las 20 toneladas promedio que se indicó que la planta trata al mes. Las toneladas ideales, se seleccionaron con el fin de obtener un valor de COCA menor a los costos operacionales de las otras plantas, el que corresponde a **CLP\$5.900 por tonelada**.

Es importante destacar que 286 toneladas es un valor que el Centro de Acopio puede recibir por capacidad, ya que cuenta con 6.200  $m^2$  y según información de la Municipalidad, el centro podría recibir con facilidad 1.000 sacas, lo que equivale a recibir 400 toneladas.

### C.1.2. Costos operacionales de plantas de tratamiento

Para encontrar los datos presentados en la Tabla C.4 se realizaron los cálculos que se explicarán a continuación, se explicitará el cálculo para el caso de COPT1, para el caso de COPT2 y COPT3 el procedimiento es análogo.

Tabla C.4: Costos de operación plantas de tratamientos.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
COPT1	Costo operación PT01	21.001,704	\$CLP/ton	[32]
COPT2	Costo operación PT02	35.458,440	\$CLP/ton	[32]
COPT3	Costo operación PT03	9.390,506	\$CLP/ton	[35]

Según la información que se tiene [32], el costo para tratar una tonelada de plástico en una planta de tratamiento mecánico era de USD\$35 para el año 2012. El valor del dólar en pesos

chilenos para el año 2012 fue de CLP\$490,3 en promedio. Multiplicando el valor en dólares por pesos chilenos da un valor de CLP\$17.160,5 lo que en Unidad de Fomento del año 2012 equivalía a 0,751 UF. Tomando el valor de la UF del año 2019, igual a CLP\$27.953,420, y multiplicando este valor por las UF calculadas previamente, da un total de CLP\$21.001,704. Las equivalencias entre dólar y peso chileno, y los valores de UF se encuentran en la página del Servicio de Impuestos Internos [55].

## C.2. Costos de inversión y capacidad de instalaciones

### C.2.1. Recopilación de parámetros

El costo de CIPL(PLN) se obtuvo directamente desde la referencia indicada, dividiendo la inversión realizada para instalar puntos limpios en la cantidad de puntos a instalar [38].

En el caso de CIPT2 y CIPT3, se realizaron cálculos análogos a los realizados en Anexos C.1 para el cálculo de los costos operacionales de las plantas de tratamientos, para traer a valor presente el encontrado en referencias.

En el caso de K1, K2 y K3, que son los factores de Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), se realizó el cálculo presentado en la ecuación C.1 [39] [56].

$$ki = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (C.1)$$

Utilizando la ecuación C.1 con los datos que se presentarán en las Tablar C.5 y C.6, se obtendrán los valores de los factores indicados.

Tabla C.5: Datos para calcular K1 y K3, para la planta de tratamiento de mecánico y para la planta de combustión. [56] [39]

Dato	Descripción	Unidad	Valor	Unidad	Unidad	Referencia
i	Tasa de descuento	5 %	-]			[35]
n	Años de préstamo	10	años			[35]
k	CAUE	0,1295	1/año	0,0108	1/mes	

Tabla C.6: Datos para calcular K2, para la planta de tratamiento de pirólisis. [56] [39]

Dato	Descripción	Unidad	Valor	Unidad	Unidad	Referencia
i	Tasa de descuento	5 %	-]			[35]
n	Años de préstamo	20	años			[57] [58]
k	CAUE	0,0802	1/año	0,0067	1/mes	

De esta manera se completa la Tabla C.7 con los parámetros encontrados y calculados.

Respecto a las capacidades que se presentan en la Tabla C.8, sus valores se obtuvieron como se indica a continuación:

- Tanto la CAP1 como la CAP2, se calcularon en base a la CAP10, debido a que la capacidad de los puntos limpios corresponde al doble de la capacidad de los puntos verdes. En este caso, como para el plástico se cuenta con una saca de 1,1  $[m^3]$ , dato entregado por la Municipalidad, volumen multiplicado por la densidad de 0,04  $[\frac{ton}{m^3}]$ , se obtiene una capacidad de 0,044 [t]. Es decir, para los puntos limpios corresponde a 0,088 [t].
- Para el centro de acopio, en base a cálculos explicados en la sección de Anexos C.1, se tiene como base que puede recibir 1.000 sacas, equivalentes a 400 [t], sin embargo, debido a la superficie del lugar es posible que pueda recibir una cantidad mayor a la calculada.
- Respecto a la capacidad de la planta de tratamiento mecánico, no se tiene el dato específico de cuánto podría recibir, sin embargo, este dato no es relevante para la resolución del problema de optimización ya que se proponen capacidades para las plantas. Además, este tipo de tecnologías ya existen en el país, y no es necesario instalarlas.
- Respecto a las capacidades de P1 y P2, se encontró el dato de las toneladas anuales que trataría cada una de las plantas, encontradas por bibliografía. Dicho dato se dividió en 12 para poder obtener el valor mensual.
- Finalmente, la capacidad del relleno sanitario se encontró por bibliografía, y se asume que la estación de transferencia puede recibir la misma cantidad que el relleno, debido a que es un lugar del que el flujo está saliendo de manera constante hacia el lugar de destino.

Tabla C.7: Valores de parámetros utilizados para calcular el costo de inversión de las instalaciones propuestas. (Calculados y obtenidos a partir de distintas fuentes)

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CIPL(PLN)	Costo instalación punto limpio	139.081.394	\$CLP	[38]
CIPT2(P2)	Costo instalación P2	7.178.989.580.970	\$CLP	[32]
CIPT3(P3)	Costo instalación P3	206.535.100.211	\$CLP	[35]
K1	Factor utilizado para anualizar costo instalación PL	0,0108	1/mes	[39]
K2	Factor utilizado para anualizar costo instalación P2	0,0067	1/mes	[39]
K3	Factor utilizado para anualizar costo instalación P3	0,0108	1/mes	[39]

Tabla C.8: Valores de las capacidades de las instalaciones existentes y propuestas del sistema. (Datos recopilados de distintas fuentes)

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CAP1(PLA)	Capacidad punto limpio antiguo	0,088	ton/mes	Municipalidad de La Granja
CAP2(PLN)	Capacidad de los puntos limpio nuevos	0,088	ton/mes	Municipalidad de La Granja
CAP3(CA)	Capacidad de centro de acopio	>400	ton/mes	Municipalidad de La Granja
CAP4(P1)	Capacidad de P1		ton/mes	No aplica
CAP5(P2)	Capacidad de P2	902,778	ton/mes	[32]
CAP6(P3)	Capacidad de P3	83.333,333	ton/mes	[35]
CAP8(ET)	Capacidad de estación de transferencia	108.333,333	ton/mes	[40]
CAP9(RS)	Capacidad de relleno sanitario	108.333,333	ton/mes	[40]
CAP10(PV)	Capacidad de puntos verdes	0,044	ton/mes	Municipalidad de La Granja

### C.2.2. Ajuste de parámetros según capacidades propuestas

Como se menciona en el desarrollo, se propone optimizar el problema suponiendo dos posibles capacidades para las plantas de tratamiento: 100 y 300 toneladas. Para poder escalar el costo de instalación se utiliza la ecuación C.2, donde  $P$  es el precio de la instalación y  $C$  es la capacidad.  $P_2$  y  $C_2$  son los valores que se presentaron en la sección anterior,  $C_1$  puede ser 100 o 300 toneladas, y  $P_1$  es la incógnita a calcular.

$$P_1 = P_2 \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{\frac{6}{10}} \quad (\text{C.2})$$

#### Valor instalación de las plantas con capacidad de 300 toneladas

En la siguiente Tabla C.9 se presentan los costos de instalación de las plantas de pirólisis y combustión, considerando una capacidad de 300 toneladas.

Tabla C.9: Costos de inversión considerando 300 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento propuestas.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CIPT2(P2)	Costo instalación P2	3.706.701.038.728	\$CLP	[32]
CIPT3(P3)	Costo instalación P3	7.059.523.206	\$CLP	[35]

#### Valor instalación de las plantas con capacidad de 100 toneladas

En la siguiente Tabla C.10 se presentan los costos de instalación de las plantas de pirólisis y combustión, considerando una capacidad de 100 toneladas.

Tabla C.10: Costos de inversión considerando 100 toneladas de capacidad para las plantas de tratamiento propuestas.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad	Referencia
CIPT2(P2)	Costo instalación P2	1.917.409.200.259	\$CLP	[32]
CIPT3(P3)	Costo instalación P3	3.651.763.280	\$CLP	[35]

## C.3. Costos de Transporte

En esta sección se explicarán los cálculos realizados para poder definir el costo por kilómetro de transporte de residuos, considerando que el rendimiento de los vehículos varía de acuerdo al peso. Además, se presentarán las capacidades determinadas para los distintos transportes.

### C.3.1. Costos de transporte camión recolector

En el caso de los camiones, tanto de recolección como el de reciclaje, poseen rendimientos diferentes en el caso de ir vacíos y con carga. La información de los rendimientos en ambos casos y en específico de los modelos que participan en este problema, son datos que no se encontraron de manera explícita. Es así como se calcularon los rendimientos y se tomaron algunos supuestos para encontrar los valores necesarios.

A partir de la relación entre la energía y la integral de potencia, ver ecuación C.3, y realizando las distintas equivalencias o relaciones correspondientes se obtiene finalmente la ecuación C.7, de esta manera se vincula la energía (que en este caso se expresa en el combustible a utilizar) y la capacidad o masa que carga el transporte.

$$E = \int P dt \quad (C.3)$$

$$E = P \cdot t \quad (C.4)$$

$$E = (F \cdot v) \cdot t \quad (C.5)$$

$$E = ((m \cdot a) \cdot v) \cdot t \quad (C.6)$$

$$E = (((m_{camión} + m_{residuos}) \cdot a) \cdot v) \cdot t \quad (C.7)$$

Los datos que se tienen son de combustible y de masa, lo que se expresa en la ecuación C.8.

$$a \cdot v \cdot t = \frac{E}{(m_{camión} + m_{residuos})} \quad (C.8)$$

Tabla C.11: Valores de datos para el cálculo del rendimiento del camión recolector.

Dato	Valor	Unidad	Referencia
Masa camión	10,00	[ton]	[59]
Capacidad de carga	7,60	[ton]	Municipalidad, [60]
Mejor rendimiento	1,18	[L/km]	[42][43]

El mejor rendimiento que se presenta en la Tabla C.11, se asumirá cuando el camión está vacío, es decir,  $m_{Residuos}$  es igual a 0 [t] y  $m_{Camión}$  a 10 [t]. Por otro lado, este y todos los rendimientos calculados, se medirán en 1 [km]. De esta manera reemplazando los datos indicados, se obtiene que  $a \cdot v \cdot t$  es igual a 0,12 [L/ton], como se expresa en la ecuación C.9.

$$0,12\left[\frac{L}{ton}\right] = \frac{E}{(m_{camión} + m_{residuos})} \quad (C.9)$$

Reemplazando en la ecuación C.9  $m_{Residuos}$  es igual a 7,60 [t] y  $m_{Camión}$  a 10 [t], se tiene que los litros necesarios para mover el camión en 1 [km] es igual a 2,07 [L].

Para obtener el rendimiento promedio se realiza una suma ponderada, como se presenta en la ecuación C.10.

$$Suma \text{ ponderada} = \frac{m_{Total_1} * R_1 + m_{Total_2} * R_2}{m_{Total_1} + m_{Total_2}} \quad (C.10)$$

Esto da como resultado 1,75 [L/km], y tomando en cuenta el valor del diésel de CLP\$600 por litro [44], el rendimiento es igual a CLP\$ 1.048.

### C.3.2. Costos de transporte camión de reciclaje

Para el cálculo de los rendimientos y el rendimiento promedio del camión de reciclaje, es análogo al procedimiento anterior, utilizando los datos presentados en la Tabla C.12.

Tabla C.12: Valores de datos para el cálculo del rendimiento del camión de reciclaje.

Dato	Valor	Unidad	Referencia
Masa camión	7,50	[t]	[61]
Capacidad de carga	5,00	[t]	[61]
Mejor rendimiento	0,78	[L/km]	[42][43]

Así, el rendimiento promedio obtenido es igual a CLP\$666 por kilómetro recorrido.

### C.3.3. Costos de transporte vehículos particulares

En cuanto a los vehículos particulares, para el rendimiento, se consideró el rendimiento promedio de los 10 vehículos más vendidos en Chile durante el año 2018 [45]. Estos valores

se presentan en la Tabla C.13.

Tabla C.13: Rendimientos de los 10 vehículos más vendidos en Chile en el año 2018. [44][45]

Nº	Marca	Modelo	Gasto en energía [\$/año]	Kilómetros anuales [km/año]	Gasto por kilómetro [\$/km]
1	Chevrolet	Sail	1.025.641	20.000	51,3
2	Kia	Rio	1.045.752	20.000	52,3
3	Kia	Morning	898.876	20.000	44,9
4	Hyundai	Accent	1.066.667	20.000	53,3
5	Toyota	Yaris	1.038.961	20.000	51,9
6	Suzuki	Swift	1.059.603	20.000	53,0
7	Hyundai	Grand	1.052.632	20.000	52,6
8	Suzuki	Baleno	919.540	20.000	46,0
9	Mazda	3	1.142.857	20.000	57,1
10	Nissan	Versa	1.118.881	20.000	55,9
<b>Promedio</b>					51,8

Por otro lado, en cuanto a la capacidad de los autos de menor tamaño se realizó el siguiente análisis. Primero, según la información de la Municipalidad [13] existen 31.200 viviendas en la comuna aproximadamente, considerando que las 12 franjas son iguales, en promedio existen 2.600 viviendas por franja. Ahora, en promedio, de acuerdo al balance de masa, se producen 19 [t] aproximadamente por franja. Dividiendo las toneladas por las viviendas, se producen 0,007 toneladas por viviendas, aproximadamente. Este es el valor que se asumirá como la capacidad promedio de los vehículos particulares.



## C.4. Puntajes asignados a los distintos tratamientos

A continuación se presenta la explicación de la selección de los distintos escenarios de puntajes propuestos.

### C.4.1. Escenario 1

El primer escenario se basa en la jerarquización de métodos para el manejo de residuos, sin tener mayor información que:

- La jerarquización considera: reducir, reutilizar, reciclar, revalorización energética y la disposición final.
- El tratamiento mecánico se considera como proceso de reciclaje.
- El tratamiento de pirólisis y la combustión son procesos de revalorización energética.

Considerando los puntos anteriores, sin saber qué tanto mejor es uno que otro método, se distribuye el puntaje de manera equitativa entre los distintos tratamientos. La gráfica de este puntaje se presenta en la Figura C.1.

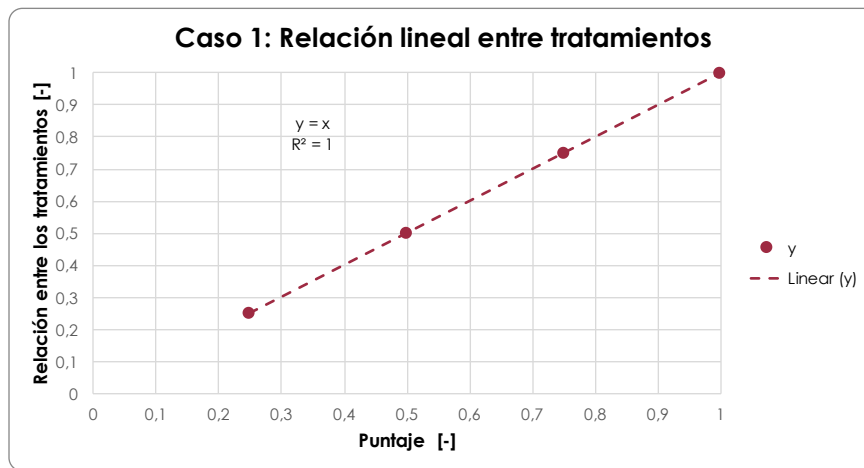


Figura C.1: Representación gráfica de la distribución de puntaje escenario 1. (Elaboración propia)

### C.4.2. Escenario 2

Luego de contar con el escenario anterior, en base a la información bibliográfica que se ha encontrado durante este trabajo, es posible notar que la distribución de puntaje otorgada no es muy representativa de la realidad.

Para poder encontrar una distribución más apropiada se empiezan a graficar datos al azar. Una vez hecho eso, se utiliza la herramienta de línea de tendencia del programa Excel,

buscando que el error cuadrático sea lo más cercano a 1. Luego de encontrar una curva adecuada y de obtener los coeficientes de la ecuación que representa la curva, se comienzan a reemplazar distintos valores de y en la ecuación para obtener los respectivos valores de x. Este proceso se realiza sólo por medio de la observación del gráfico.

El gráfico que se presenta en la Figura C.2, es el que se seleccionó finalmente para otorgar puntajes. A modo de ejemplo, lo que se hizo fue graficar algunos puntos, asumiendo que podrían representar algunos tratamientos.

Una vez obtenida la curva, lo que se analizó es que el punto que corresponde al 1 tanto para el eje x como el y, debe ser el de disposición final. Por otro lado, el otro extremo debe ser el tratamiento mecánico, muy cercano a lo ideal, por lo que se considera un valor 0 en y, lo que corresponde a un valor cercano a 0,1 en x (reemplazando en la ecuación). Ahora, ¿qué ocurre con los otros tratamientos? En el caso de la pirólisis también debe encontrarse cerca del reciclaje, así que se le asocia el valor de 0,2 en y, equivalente a 0,168 en x.

La duda queda con el tratamiento de combustión, sin embargo, según las fuentes encontradas [36] la disposición final en la mayoría de los casos de análisis de ciclo de vida, debe ser la última opción a considerar, esto también corresponde a lo que se indica por la jerarquización [6]. De esta manera, se considera que la combustión también debe estar cerca del resto de los tratamientos considerando un valor de 0,4 en y, equivalente a 0.255 en x.

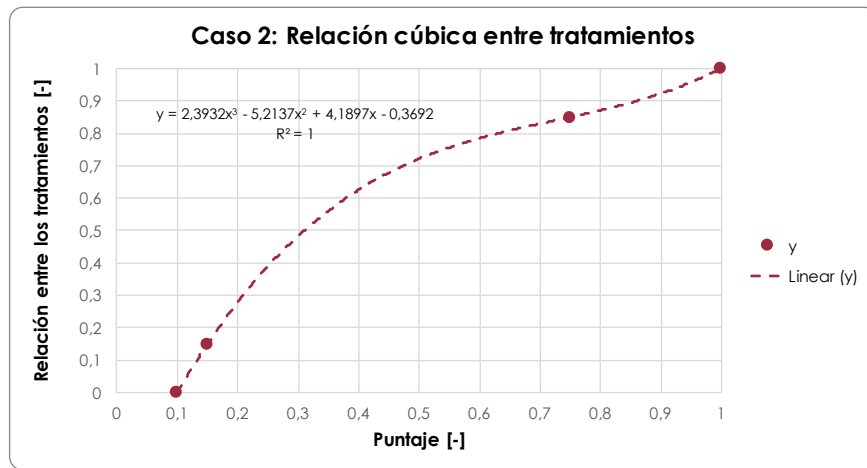


Figura C.2: Representación gráfica de la distribución de puntaje escenario 2. (Elaboración propia)

## C.5. Código

```
*****
Sets

FR franjas /FR1*FR12/
PL puntos limpios /PL1*PL13/
    set PLA(PL) subset puntos antiguos /PL1/
    set PLN(PL) subset puntos nuevos /PL2, PL3, PL4, PL5, PL6, PL7
,
    PL8, PL9, PL10, PL11, PL12,
    PL13/
PV puntos verdes /PV1, PV2, PV3, PV4, PV5, PV6, PV7, PV8, PV9, PV10,
PV11, PV12, PV13, PV14, PV15, PV16, PV17, PV18,
PV19,
    PV20, PV21, PV22, PV23, PV24, PV25, PV26, PV27,
PV28/
CA centro de acopio /CA0/
ET estacion de transferencia /ET0/
RS relleno sanitario /RS0/
PT plantas de tratamiento /PT01, PT02, PT03, PT04/
    set P1(PT) subset tratamiento mecanico /PT01/
    set P2(PT) subset tratamiento pirolisis /PT02/
    set P3(PT) subset tratamiento combustion /PT03/

*****
Parameters

M big M /1000000000/

*Parametros de operacion
CDF costo de disposicion final por ton /12500/
COCA costo operacion CA por ton /5900/
CT costo transporte de camion por km /1048/
CTT costo transporte de camion por km /666/
CV costo transporte de automov por km /52/
COPT1(P1) costo operacion P1 por ton /PT01 21000/
COPT2(P2) costo operacion P2 por ton /PT02 35500/
COPT3(P3) costo operacion P3 por ton /PT03 9400/
CAPCT capacidad camion recolector /7.6/
CAPCTT capacidad camion reciclaje /5/
CAPCV capacidad auto /0.007/

*Parametros de instalacion
CIPL(PLN) costo instalacion punto limpio nuevos
    /PL2 139000000
    PL3 139000000
    PL4 139000000
    PL5 139000000
    PL6 139000000
    PL7 139000000
    PL8 139000000
    PL9 139000000
    PL10 139000000
    PL11 139000000
    PL12 139000000
```

PL13 139000000/  
K1 factor utilizado para annualizar costo instalacion PL /0.0108/  
CIPT2(P2) costo instalacion P2 /PT02 1917409200259/  
CIPT3(P3) costo instalacion P3 /PT03 3651763000/  
K2 factor utilizado para annualizar costo instalacion P2 /0.0067/  
K3 factor utilizado para annualizar costo instalacion P3 /0.0108/

\*Parametros de capacidad de instalaciones

CAP1(PLA) capacidad PL1 /PL1 0.088/  
CAP2(PLN) capacidad PLN  
/PL2 0.088  
PL3 0.088  
PL4 0.088  
PL5 0.088  
PL6 0.088  
PL7 0.088  
PL8 0.088  
PL9 0.088  
PL10 0.088  
PL11 0.088  
PL12 0.088  
PL13 0.088/  
CAP8(ET) capacidad ET /ET0 230.03/  
CAP9(RS) capacidad RS /RS0 230.03/  
CAP10(PV) capacidad PV  
/PV1 0.044  
PV2 0.044  
PV3 0.044  
PV4 0.044  
PV5 0.044  
PV6 0.044  
PV7 0.044  
PV8 0.044  
PV9 0.044  
PV10 0.044  
PV11 0.044  
PV12 0.044  
PV13 0.044  
PV14 0.044  
PV15 0.044  
PV16 0.044  
PV17 0.044  
PV18 0.044  
PV19 0.044  
PV20 0.044  
PV21 0.044  
PV22 0.044  
PV23 0.044  
PV24 0.044  
PV25 0.044  
PV26 0.044  
PV27 0.044  
PV28 0.044/

\*Parametros de capacidades de plantas de tratamiento para caso 1

CAP3(CA) capacidad CA /CA0 230.03/

CAP4(P1) capacidad P1 /PT01 300/  
CAP5(P2) capacidad P2 /PT02 300/  
CAP6(P3) capacidad P3 /PT03 300/

\*Parametros de capacidades de plantas de tratamiento para caso 2

\* CAP4(P1) capacidad P1 /PT01 100/  
\* CAP5(P2) capacidad P2 /PT02 100/  
\* CAP6(P3) capacidad P3 /PT03 100/

\*Parametros para puntajes de tratamientos , escenario 1

S1(P1) puntaje para P1 /PT01 0.099/  
S2(P2) puntaje para P2 /PT02 0.168/  
S3(P3) puntaje para P3 /PT03 0.255/  
S5(RS) puntaje para RS /RS0 1.000/

\*Parametros para puntajes de tratamientos , escenario 2

\* S1(P1) puntaje para P1 /PT01 0.25/  
\* S2(P2) puntaje para P2 /PT02 0.50/  
\* S3(P3) puntaje para P3 /PT03 0.75/  
\* S5(RS) puntaje para RS /RS0 1.00/

\*Parametros para entrada de plastico a las franjas

E0(FR) entradas a franjas ton  
/FR1 27.39  
FR2 27.57  
FR3 22.26  
FR4 22.09  
FR5 23.00  
FR6 22.91  
FR7 17.08  
FR8 16.97  
FR9 10.58  
FR10 10.75  
FR11 14.75  
FR12 14.68/

\*Programacion por metas

F01ID valor ideal /6508549.6842/  
F01ANID valor anti ideal /7494044.0074/  
F02ID valor ideal /1683189.1/  
F02ANID valor anti ideal /10000000/  
w1 peso de F01 /0.5/  
w2 peso de F02 /0.5/

;

\*Distancia entre punto limpio antiguo y centro de acopio

Table D1(PLA,CA)  
CA0  
PL1 8

;

\*Distancia entre punto limpio nuevo y centro de acopio

Table D2(PLN,CA)  
CA0  
PL2 8

PL3	2
PL4	8
PL5	6
PL6	8
PL7	8
PL8	14
PL9	10
PL10	8
PL11	4
PL12	1.86
PL13	6

;

\*Distancia entre franjas y estacion de transferencia

Table D3(FR,ET)

	ET0
FR1	65
FR2	58
FR3	50
FR4	56
FR5	50
FR6	56
FR7	50
FR8	50
FR9	38
FR10	46
FR11	42
FR12	48

;

\*Distancia entre franjas y centro de acopio

Table D4(FR,CA)

	CA0
FR1	49
FR2	29
FR3	36
FR4	34
FR5	42
FR6	40
FR7	42
FR8	38
FR9	38
FR10	40
FR11	40
FR12	46

;

\*Distancia entre puntos verdes y centro de acopio

Table D5(PV,CA)

	CA0
PV1	12
PV2	2
PV3	4
PV4	4
PV5	4
PV6	6

PV7 6  
 PV8 4  
 PV9 6  
 PV10 2  
 PV11 4  
 PV12 6  
 PV13 4  
 PV14 4  
 PV15 2  
 PV16 4  
 PV17 8  
 PV18 4  
 PV19 6  
 PV20 12  
 PV21 12  
 PV22 10  
 PV23 8  
 PV24 6  
 PV25 12  
 PV26 12  
 PV27 4  
 PV28 4

;

\*Distancia entre centro de acopio y estacion de transferencia

Table D6(CA,ET)

ET0

CA0 32

;

\*Distancia entre estacion de transferencia y relleno sanitario

Table D7(ET,RS)

RS0

ET0 62

;

\*Distancia entre franjas y puntos verdes

Table D8(FR,PV)

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7	PV8	PV9	PV10	PV11	PV12
FR1	8.00	4.00	4.00	4.00	2.00	4.00	2.00	1.26	4.00	4.00	4.00	4.00
	0.88	4.00	8.00	1.19	8.00	4.00	4.00	8.00	10.00	8.00	4.00	4.00
	8.00	8.00	4.00	4.00								
FR2	10.00	2.00	2.00	1.96	1.60	6.00	4.00	4.00	4.00	0.79	2.00	4.00
	4.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	10.00	10.00	8.00	6.00	6.00
	12.00	10.00	2.00	4.00								
FR3	8.00	4.00	1.95	2.00	2.00	4.00	2.00	2.00	0.95	4.00	2.00	2.00
	4.00	1.65	10.00	4.00	6.00	1.92	2.00	6.00	8.00	6.00	1.97	1.94
	8.00	8.00	1.99	1.77								
FR4	10.00	4.00	1.44	1.36	1.98	4.00	4.00	4.00	4.00	1.88	0.54	4.00
	4.00	1.55	8.00	4.00	4.00	1.48	4.00	8.00	8.00	6.00	4.00	4.00
	10.00	8.00	1.48	2.00								
FR5	6.00	6.00	4.00	4.00	4.00	1.59	4.00	4.00	1.97	6.00	6.00	0.81
	6.00	4.00	12.00	6.00	4.00	4.00	1.14	4.00	6.00	4.00	1.98	4.00
	6.00	6.00	4.00	2.00								

FR6	6.00	6.00	2.00	4.00	4.00	1.35	4.00	4.00	4.00	4.00	2.00	2.00
	6.00	4.00	10.00	6.00	2.00	2.00	1.63	6.00	6.00	4.00	4.00	6.00
	8.00	6.00	2.00	2.00								
FR7	6.00	8.00	6.00	6.00	8.00	4.00	8.00	8.00	6.00	10.00	8.00	4.00
	8.00	6.00	16.00	8.00	4.00	6.00	4.00	4.00	6.00	4.00	8.00	8.00
	6.00	4.00	6.00	6.00								
FR8	6.00	6.00	4.00	6.00	6.00	2.00	6.00	6.00	6.00	6.00	4.00	4.00
	8.00	4.00	12.00	6.00	0.91	4.00	2.00	4.00	4.00	2.00	6.00	6.00
	6.00	4.00	4.00	4.00								
FR9	0.97	10.00	6.00	8.00	8.00	4.00	8.00	8.00	6.00	10.00	8.00	6.00
	8.00	8.00	20.00	8.00	4.00	6.00	6.00	0.74	1.10	2.00	4.00	6.00
	1.29	1.85	6.00	6.00								
FR10	2.00	8.00	4.00	6.00	6.00	2.00	6.00	6.00	6.00	8.00	6.00	4.00
	8.00	6.00	14.00	8.00	1.45	4.00	4.00	2.00	1.86	0.65	6.00	8.00
	4.00	2.00	4.00	4.00								
FR11	1.54	12.00	8.00	10.00	10.00	6.00	10.00	10.00	8.00	10.00	10.00	8.00
	10.00	8.00	20.00	10.00	4.00	8.00	6.00	2.00	1.67	4.00	6.00	8.00
	1.86	4.00	8.00	8.00								
FR12	2.00	10.00	6.00	8.00	8.00	4.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	6.00
	8.00	6.00	14.00	8.00	2.00	6.00	4.00	4.00	1.95	1.31	8.00	8.00
	4.00	4.00	6.00	6.00								

;

\*Distancia entre estacion de transferencia y relleno sanitario

Table D9(FR,PLA)

PL1

FR1	8.00
FR2	6.00
FR3	6.00
FR4	4.00
FR5	4.00
FR6	1.73
FR7	6.00
FR8	2.00
FR9	6.00
FR10	4.00
FR11	8.00
FR12	6.00

;

\*Distancia entre franjas y puntos limpios nuevos

Table D10(FR,PLN)

	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	PL8	PL9	PL10	PL11	PL12	PL13
FR1	6.00	2.00	8.00	6.00	6.00	6.00	10.00	10.00	6.00	1.61	4.00	4.00
FR2	6.00	0.85	6.00	4.00	6.00	6.00	12.00	8.00	8.00	4.00	0.39	4.00
FR3	4.00	4.00	6.00	4.00	4.00	4.00	10.00	8.00	4.00	2.00	4.00	2.00
FR4	4.00	2.00	4.00	4.00	4.00	4.00	10.00	8.00	6.00	2.00	1.95	2.00
FR5	2.00	6.00	4.00	2.00	1.61	1.58	8.00	6.00	2.00	4.00	6.00	1.74
FR6	2.00	4.00	2.00	0.98	1.80	4.00	8.00	4.00	4.00	4.00	4.00	2.00
FR7	2.00	10.00	2.00	4.00	4.00	4.00	8.00	6.00	6.00	6.00	10.00	4.00
FR8	0.71	6.00	1.31	2.00	2.00	4.00	6.00	4.00	6.00	6.00	6.00	4.00
FR9	4.00	10.00	4.00	4.00	6.00	4.00	2.00	4.00	4.00	6.00	10.00	6.00
FR10	1.19	6.00	1.79	2.00	4.00	4.00	4.00	2.00	6.00	6.00	8.00	4.00
FR11	4.00	10.00	6.00	6.00	6.00	6.00	0.75	4.00	6.00	8.00	10.00	8.00
FR12	2.00	8.00	2.00	4.00	4.00	4.00	2.00	1.68	6.00	8.00	8.00	4.00

;



\*\*\*\*\*

Positive variable

F1(FR,PLA) flujo de FR a PLA  
F2(FR,PLN) flujo de FR a PLN  
F3(FR,PV) flujo de FR a PV  
F4(FR,CA) flujo de FR a CA  
F5(FR,ET) flujo de FR a ET  
F6(PLA,CA) flujo de PLA a CA  
F7(PLN,CA) flujo de PLN a CA  
F8(CA,ET) flujo de CA a ET  
F9(ET,RS) flujo de ET a RS  
F10(CA,P1) flujo de CA a P1  
F11(CA,P2) flujo de CA a P2  
F12(CA,P3) flujo de CA a P3  
F13(CA,P4) flujo de CA a P4  
F14(PV,CA) flujo de PV a CA

;

\*\*\*\*\*

Binary variable

A(PLN), B(P2), C(P3), E1(FR,CA), E2(FR,ET), E3(PLA,CA), E4(PLN,CA), E5(CA,ET),  
E6(ET,RS), E7(PV,CA)

;

\*\*\*\*\*

Free variable

C01  
C02  
C03  
C04  
C05  
F01  
F02  
F03  
gamma

;

\*\*\*\*\*

Equations

BMG, BM1, BM2(PLN), BM3, BM4(PV), BM5, BM6(FR), BM7,  
CA1, CA2(PLN), CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8, CA9, CA10(PV),  
L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13, L14, L15, L16, L17, L18  
, L19, L20, L21, L22,  
ec1, ec2, ec3, ec4, ec5, ec6, ec7, ec8  
,P01, P02, P03

;

\*Restricciones referidas al balance de masa global

BMG.. sum((FR,PLA),F1(FR,PLA))+ sum((FR,PLN),F2(FR,PLN))+ sum((FR,PV),F3(FR,PV)))+  
sum((FR,CA),F4(FR,CA))+ sum((FR,ET),F5(FR,ET))=E=  
sum((CA,P1),F10(CA,P1))+ sum((CA,P2),F11(CA,P2))+ sum((CA,P3),F12(CA,P3)))+  
+ sum((ET,RS),F9(ET,RS));

\*Restricciones referidas al BM

BM1..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{PLA}), \text{F1}(\text{FR}, \text{PLA})) =E= \text{sum}((\text{PLA}, \text{CA}), \text{F6}(\text{PLA}, \text{CA}));$   
 BM2(PLN) ..  $\text{sum}(\text{FR}, \text{F2}(\text{FR}, \text{PLN})) =E= \text{F7}(\text{PLN}, ' \text{CA0} ');$   
 BM3..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{CA}), \text{F4}(\text{FR}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PV}, \text{CA}), \text{F14}(\text{PV}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PLA}, \text{CA}), \text{F6}(\text{PLA}, \text{CA})) +$   
 $\text{sum}((\text{PLN}, \text{CA}), \text{F7}(\text{PLN}, \text{CA})) =E= \text{sum}((\text{CA}, \text{P1}), \text{F10}(\text{CA}, \text{P1})) + \text{sum}((\text{CA}, \text{P2}), \text{F11}(\text{CA}, \text{P2})) +$   
 $\text{sum}((\text{CA}, \text{P3}), \text{F12}(\text{CA}, \text{P3})) + \text{sum}((\text{CA}, \text{ET}), \text{F8}(\text{CA}, \text{ET}));$   
 BM4(PV) ..  $\text{sum}(\text{FR}, \text{F3}(\text{FR}, \text{PV})) =E= \text{F14}(\text{PV}, ' \text{CA0} ');$   
 BM5..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{ET}), \text{F5}(\text{FR}, \text{ET})) + \text{sum}((\text{CA}, \text{ET}), \text{F8}(\text{CA}, \text{ET})) =E= \text{sum}((\text{ET}, \text{RS}), \text{F9}(\text{ET}, \text{RS}));$   
 BM6(FR) ..  $\text{sum}(\text{PLA}, \text{F1}(\text{FR}, \text{PLA})) + \text{sum}(\text{PLN}, \text{F2}(\text{FR}, \text{PLN})) + \text{sum}(\text{PV}, \text{F3}(\text{FR}, \text{PV})) +$   
 $\text{sum}(\text{CA}, \text{F4}(\text{FR}, \text{CA})) + \text{sum}(\text{ET}, \text{F5}(\text{FR}, \text{ET})) =E= \text{E0}(\text{FR});$   
 BM7..  $\text{sum}((\text{CA}, \text{ET}), \text{F8}(\text{CA}, \text{ET})) =G= (\text{sum}((\text{FR}, \text{CA}), \text{F4}(\text{FR}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PV}, \text{CA}), \text{F14}(\text{PV}, \text{CA})) +$   
 $\text{sum}((\text{PLA}, \text{CA}), \text{F6}(\text{PLA}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PLN}, \text{CA}), \text{F7}(\text{PLN}, \text{CA}))) * (0.1);$

\*Restricciones referidas a las capacidades

CA1..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{PLA}), \text{F1}(\text{FR}, \text{PLA})) =L= \text{CAP1}(' \text{PL1} ');$   
 CA2(PLN) ..  $\text{sum}(\text{FR}, \text{F2}(\text{FR}, \text{PLN})) =L= \text{CAP2}(\text{PLN});$   
 CA3..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{CA}), \text{F4}(\text{FR}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PV}, \text{CA}), \text{F14}(\text{PV}, \text{CA})) + \text{sum}((\text{PLA}, \text{CA}), \text{F6}(\text{PLA}, \text{CA})) +$   
 $\text{sum}((\text{PLN}, \text{CA}), \text{F7}(\text{PLN}, \text{CA})) =L= \text{CAP3}(' \text{CA0} ');$   
 CA4..  $\text{sum}((\text{CA}, \text{P1}), \text{F10}(\text{CA}, \text{P1})) =L= \text{CAP4}(' \text{PT01} ');$   
 CA5..  $\text{sum}((\text{CA}, \text{P2}), \text{F11}(\text{CA}, \text{P2})) =L= \text{CAP5}(' \text{PT02} ');$   
 CA6..  $\text{sum}((\text{CA}, \text{P3}), \text{F12}(\text{CA}, \text{P3})) =L= \text{CAP6}(' \text{PT03} ');$   
 CA8..  $\text{sum}((\text{FR}, \text{ET}), \text{F5}(\text{FR}, \text{ET})) + \text{sum}((\text{CA}, \text{ET}), \text{F8}(\text{CA}, \text{ET})) =L= \text{CAP8}(' \text{ET0} ');$   
 CA9..  $\text{sum}((\text{ET}, \text{RS}), \text{F9}(\text{ET}, \text{RS})) =L= \text{CAP9}(' \text{RS0} ');$   
 CA10(PV) ..  $\text{sum}(\text{FR}, \text{F3}(\text{FR}, \text{PV})) =L= \text{CAP10}(\text{PV});$

\*Restricciones referidas a la logica

L1(PLN) ..  $\text{sum}(\text{FR}, \text{F2}(\text{FR}, \text{PLN})) =L= \text{A}(\text{PLN}) * \text{M};$   
 L2(CA, P2) ..  $\text{F11}(\text{CA}, \text{P2}) =L= \text{B}(\text{P2}) * \text{M};$   
 L3(CA, P3) ..  $\text{F12}(\text{CA}, \text{P3}) =L= \text{C}(\text{P3}) * \text{M};$   
 L5(PLN) ..  $\text{A}(\text{PLN}) =L= \text{sum}(\text{FR}, \text{F2}(\text{FR}, \text{PLN})) * \text{M};$   
 L6(CA, P2) ..  $\text{B}(\text{P2}) =L= \text{F11}(\text{CA}, \text{P2}) * \text{M};$   
 L7(CA, P3) ..  $\text{C}(\text{P3}) =L= \text{F12}(\text{CA}, \text{P3}) * \text{M};$   
 L9(FR, CA) ..  $\text{F4}(\text{FR}, \text{CA}) =L= \text{E1}(\text{FR}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L10(FR, ET) ..  $\text{F5}(\text{FR}, \text{ET}) =L= \text{E2}(\text{FR}, \text{ET}) * \text{M};$   
 L11(PLA, CA) ..  $\text{F6}(\text{PLA}, \text{CA}) =L= \text{E3}(\text{PLA}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L12(PLN, CA) ..  $\text{F7}(\text{PLN}, \text{CA}) =L= \text{E4}(\text{PLN}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L13(CA, ET) ..  $\text{F8}(\text{CA}, \text{ET}) =L= \text{E5}(\text{CA}, \text{ET}) * \text{M};$   
 L14(ET, RS) ..  $\text{F9}(\text{ET}, \text{RS}) =L= \text{E6}(\text{ET}, \text{RS}) * \text{M};$   
 L15(PV, CA) ..  $\text{F14}(\text{PV}, \text{CA}) =L= \text{E7}(\text{PV}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L16(FR, CA) ..  $\text{E1}(\text{FR}, \text{CA}) =L= \text{F4}(\text{FR}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L17(FR, ET) ..  $\text{E2}(\text{FR}, \text{ET}) =L= \text{F5}(\text{FR}, \text{ET}) * \text{M};$   
 L18(PLA, CA) ..  $\text{E3}(\text{PLA}, \text{CA}) =L= \text{F6}(\text{PLA}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L19(PLN, CA) ..  $\text{E4}(\text{PLN}, \text{CA}) =L= \text{F7}(\text{PLN}, \text{CA}) * \text{M};$   
 L20(CA, ET) ..  $\text{E5}(\text{CA}, \text{ET}) =L= \text{F8}(\text{CA}, \text{ET}) * \text{M};$   
 L21(ET, RS) ..  $\text{E6}(\text{ET}, \text{RS}) =L= \text{F9}(\text{ET}, \text{RS}) * \text{M};$   
 L22(PV, CA) ..  $\text{E7}(\text{PV}, \text{CA}) =L= \text{F14}(\text{PV}, \text{CA}) * \text{M};$

\*Funcion objetivo

ec1 ..  $\text{C01} =e= \text{CDF} * \text{F9}(' \text{ET0} ', ' \text{RS0} ');$   
 ec2 ..  $\text{C02} =e= \text{COCA} * (\text{sum}((\text{PLN}, \text{CA}), \text{F7}(\text{PLN}, \text{CA})) +$

```

sum((PLA,CA),F6(PLA,CA))+
sum((PV,CA),F14(PV,CA))+
sum((FR,CA),F4(FR,CA));

ec3.. C03 =e= (CT/CAPCT)*(
sum((FR,ET),F5(FR,ET)*D3(FR,ET))+
sum((CA,ET),F8(CA,ET)*D6(CA,ET))+
sum((ET,RS),F9(ET,RS)*D7(ET,RS)))+
(CTT/CAPCTT)*(
sum((PLA,CA),F6(PLA,CA)*D1(PLA,CA))+
sum((PLN,CA),F7(PLN,CA)*D2(PLN,CA))+
sum((PV,CA),F14(PV,CA)*D5(PV,CA))+
sum((FR,CA),F4(FR,CA)*D4(FR,CA))+
(CV/CAPCV)*(
sum((FR,PV),F3(FR,PV)*D8(FR,PV))+
sum((FR,PLA),F1(FR,PLA)*D9(FR,PLA))+
sum((FR,PLN),F2(FR,PLN)*D10(FR,PLN))
));

ec4.. C04 =e= COPT1('PT01')*(sum((CA,P1),F10(CA,P1)))+
COPT2('PT02')*(sum((CA,P2),F11(CA,P2)))+
COPT3('PT03')*(sum((CA,P3),F12(CA,P3)));

ec5.. C05 =e= sum(PLN,K1*CIPL(PLN)*A(PLN)) +
K2*CIPT2('PT02')*B('PT02') +
K3*CIPT3('PT03')*C('PT03');

ec6.. F01 =e= C01 + C02 + C03 + C04 + C05;
ec7.. F02 =e= (1)*(
(sum((CA,P1),F10(CA,P1))/CAP4('PT01'))*S1('PT01')+
(sum((CA,P2),F11(CA,P2))/CAP5('PT02'))*S2('PT02')+
(sum((CA,P3),F12(CA,P3))/CAP6('PT03'))*S3('PT03')+
(F9('ET0','RS0')/CAP9('RS0'))*S5('RS0')
);

*Programacion por metas
P01.. gamma =G= 0;
P02.. (F01ID - F01)/(F01ID - F01ANID) =L= w1*gamma;
P03.. (F02ID - F02)/(F02ID - F02ANID) =L= w2*gamma;

MODEL MEMORIA / ALL / ;
OPTION LIMROW = 0 ;
OPTION LIMCOL = 0 ;
OPTION MIP = CPLEX;
OPTION OptCR = 0.0000000000001;
OPTION OptCA = 0.0000000000001;
OPTION dispwidth = 14;
OPTION decimals = 8;

SOLVE MEMORIA USING MIP MINIMIZING gamma;

```

# Anexo D

## Solución problema de optimización

### D.1. Optimización multiobjetivo

Para poder realizar el método de programación por metas lo primero que se realiza es obtener los valores óptimos de las funciones mono objetivos, de esta manera si, por ejemplo, se optimiza la función de costos (F01) el óptimo corresponderá al valor ideal de F01, y el valor que se obtenga de la función de puntajes ambientales al optimizar F01 será el valor anti-ideal de F02. Para encontrar el valor ideal de F02 y el anti-ideal de F01, el procedimiento es análogo, optimizando F02.

Para este caso, como los rangos o valores numéricos que recorren ambas funciones son distintos en órdenes de magnitud, se utilizará la ecuación D.1, para normalizar y trabajar con rangos entre 0 y 1.

$$FO_{i_n} = \frac{(FO_i^{ideal} - FO_i(x, y))}{(FO_i^{ideal} - FO_i^{anti-ideal})} \quad (D.1)$$

Por otro lado, la importancia o peso ( $w_i \in \mathbb{R}^+$ ) que se le otorga a cada una de las funciones, queda expresado en la ecuación D.2. En ella  $\gamma$  es la distancia entre el punto de utopía y el óptimo a obtener, y lo que se busca en el método de programación por metas, es minimizar esta distancia.

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad FO_{i_n} \leq w_i \gamma \quad w_i \in \mathbb{R}^+ \quad (D.2)$$

A modo de ejemplo, observar la Tabla D.1. Aquí se indicó que al optimizar cada una de las funciones objetivos se obtuvieron los valores ideales e anti-ideales de cada una.

Tabla D.1: Valores reales punto ideal y anti ideal.

Puntos	Valor
F01 IDEAL	7.162.964
F02 IDEAL	0,815
F01 ANTI IDEAL	7.241.679
F02 ANTI IDEAL	0,949

Ahora, al darle una importancia del 90 % a F01 y del 10 % a F02, como se muestra en la Figura D.1, se obtienen los valores que en ella se muestran. Aplicando la ecuación D.1 en ambas funciones:

$$FO_1 = \frac{7.162.964 - 7.169.872,949}{7.162.964 - 7.241.679} = 0,08777$$

$$FO_2 = \frac{0,815 - 0,920}{0,815 - 0,949} = 0,78992$$

Punto 2	
F01	90%
F02	10%
F01[\$/mes]	7.169.872,949
F02 [-]	0,920
F01*	0,08777
F02*	0,78992

Figura D.1: Ejemplo de cálculo para el método de programación por metas. (Elaboración propia)

El ejemplo de cálculo anterior se realiza con todos los puntos óptimos que se presentan a continuación, en cada uno de los cuatro problemas propuestos.

### D.1.1. Problema 1

A continuación, se aplica el procedimiento explicado para distintas importancias a las distintas funciones para el problema 1: capacidad de 100 toneladas para las plantas de tratamiento y el puntaje del caso 1.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla D.2.

Tabla D.2: Problema 1: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas.

Punto	% F01	%F02	F01 [\$/mes]	F02 [-]	F01 (normalizado)	F02 (normalizado)
1	100	0	6.508.549,684	1,000	0,000	1,000
2	90	10	6.543.660,481	0,973	0,095	0,854
3	80	20	6.576.007,130	0,950	0,182	0,729
4	70	30	6.609.010,164	0,932	0,271	0,633
5	60	40	6.641.974,472	0,915	0,361	0,541
6	50	50	6.677.786,626	0,900	0,457	0,457
7	40	60	6.714.669,257	0,884	0,557	0,371
8	30	70	6.752.745,663	0,852	0,660	0,200
9	20	80	6.792.262,114	0,851	0,767	0,192
10	10	90	6.833.196,072	0,833	0,877	0,097
11	0	100	6.878.649,473	0,815	1,000	0,000

### D.1.2. Problema 2

A continuación, se aplica el procedimiento explicado para distintas importancias a las distintas funciones para el problema 2: capacidad de 100 toneladas para las plantas de tratamiento y el puntaje del caso 2.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla D.3.

Tabla D.3: Problema 2: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas.

Punto	% F01	%F02	F01 [\$/mes]	F02 [-]	F01 (normalizado)	F02 (normalizado)
1	100	0	6.508.549,684	1,000	0,000	1,000
2	90	10	45.740.974,000	0,485	0,003	0,162
3	80	20	45.806.855,000	0,485	0,003	0,162
4	70	30	45.806.855,000	0,485	0,003	0,162
5	60	40	45.833.387,000	0,485	0,003	0,162
6	50	50	45.823.112,000	0,485	0,003	0,162
7	40	60	45.823.112,000	0,485	0,003	0,162
8	30	70	45.823.112,000	0,485	0,003	0,162
9	20	80	45.820.743,000	0,485	0,003	0,162
10	10	90	12.855.300.000,000	0,453	0,997	0,111
11	0	100	12.894.940.000,000	0,385	1,000	0,000

### D.1.3. Problema 3

A continuación, se aplica el procedimiento explicado para distintas importancias a las distintas funciones para el problema 3: capacidad de 300 toneladas para las plantas de tratamiento y el puntaje del caso 1.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla D.4.

Tabla D.4: Problema 3: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas.

Punto	% F01	%F02	F01 [\$/mes]	F02 [-]	F01 (normalizado)	F02 (normalizado)
1	100	0	6.508.549,684	1,000	0,000	1,000
2	90	10	6.600.033,986	0,880	0,093	0,835
3	80	20	6.687.610,300	0,801	0,182	0,727
4	70	30	6.774.397,380	0,730	0,270	0,629
5	60	40	6.860.528,721	0,662	0,357	0,536
6	50	50	6.948.315,453	0,597	0,446	0,446
7	40	60	7.040.954,859	0,535	0,540	0,360
8	30	70	7.139.524,311	0,472	0,640	0,274
9	20	80	7.243.010,153	0,408	0,745	0,186
10	10	90	7.361.925,179	0,343	0,866	0,096
11	0	100	7.494.044,007	0,273	1,000	0,000

#### D.1.4. Problema 4

A continuación, se aplica el procedimiento explicado para distintas importancias a las distintas funciones para el problema 4: capacidad de 300 toneladas para las plantas de tratamiento y el puntaje del caso 2.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla D.5.

Tabla D.5: Problema 4: Resultados obtenidos otorgando distintas importancias a las funciones objetivo propuestas.

Punto	% F01	%F02	F01 [\$/mes]	F02 [-]	F01 (normalizado)	F02 (normalizado)
1	100	0	6.508.549,684	1,000	0,000	1,000
2	90	10	6.600.033,986	0,863	0,093	0,835
3	80	20	6.687.610,300	0,773	0,182	0,727
4	70	30	6.774.397,380	0,692	0,270	0,629
5	60	40	6.860.528,721	0,614	0,357	0,536
6	50	50	6.948.315,453	0,539	0,446	0,446
7	40	60	7.040.954,859	0,468	0,540	0,360
8	30	70	7.139.524,311	0,397	0,640	0,274
9	20	80	7.243.010,153	0,323	0,745	0,186
10	10	90	7.361.925,179	0,248	0,866	0,096
11	0	100	7.494.044,007	0,168	1,000	0,000

## D.2. Óptimos

### D.2.1. Problema 1

#### Documento entregado por GAMS

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 05:52:45 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation
```

```
COMPILATION TIME = 0.015 SECONDS 3 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 05:52:45 Page 2
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	51	SINGLE EQUATIONS	280
BLOCKS OF VARIABLES	33	SINGLE VARIABLES	653
NON ZERO ELEMENTS	3,505	DISCRETE VARIABLES	82

```
GENERATION TIME = 0.000 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 05:52:45 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### S O L V E S U M M A R Y

MODEL	MEMORIA	OBJECTIVE	gamma
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	Cplex	FROM LINE	464

```
**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE 0.9145
```

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.032	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	71	2000000000

```
IBM ILOG CPLEX 28.1.0 r5b48834 Released Aug 02, 2019 WEI x86 64bit/MS Window
— GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
Cplex 12.9.0.0
```



Space for names approximately 0.02 Mb  
 Use option 'names no' to turn use of names off  
 MIP status(101): integer optimal solution  
 Cplex Time: 0.02sec (det. 9.19 ticks)  
 Fixing integer variables, and solving final LP...  
 Fixed MIP status(1): optimal  
 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.69 ticks)  
 Proven optimal solution.

MIP Solution: 0.914548 (67 iterations, 0 nodes)  
 Final Solve: 0.914548 (4 iterations)  
 Best possible: 0.914548  
 Absolute gap: 0.000000  
 Relative gap: 0.000000

—— VAR F1 flujo de FR a PLA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL1	.	.	+INF	0.1263
FR2 .PL1	.	.	+INF	0.0958
FR3 .PL1	.	.	+INF	0.0943
FR4 .PL1	.	.	+INF	0.0569
FR5 .PL1	.	.	+INF	0.0571
FR6 .PL1	.	.	+INF	0.0128
FR7 .PL1	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PL1	.	.	+INF	0.0199
FR9 .PL1	.	.	+INF	0.0984
FR10 .PL1	.	.	+INF	0.0585
FR11 .PL1	.	.	+INF	0.1343
FR12 .PL1	.	.	+INF	0.0950

—— VAR F2 flujo de FR a PLN

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL2	.	.	+INF	0.0932
FR1 .PL3	.	.	+INF	0.0148
FR1 .PL4	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PL5	.	.	+INF	0.0902
FR1 .PL6	.	.	+INF	0.0891
FR1 .PL7	.	.	+INF	0.0891
FR1 .PL8	.	.	+INF	0.1641
FR1 .PL9	.	.	+INF	0.1635
FR1 .PL10	.	.	+INF	0.0891
FR1 .PL11	.	.	+INF	0.0075
FR1 .PL12	.	.	+INF	0.0605
FR1 .PL13	.	.	+INF	0.0519
FR2 .PL2	.	.	+INF	0.0999
FR2 .PL3	.	.	+INF	3.7865424E-5
FR2 .PL4	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PL5	.	.	+INF	0.0597
FR2 .PL6	.	.	+INF	0.0958

FR2 .PL7	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PL8	.	.	+INF	0.2079
FR2 .PL9	.	.	+INF	0.1330
FR2 .PL10	.	.	+INF	0.1330
FR2 .PL11	.	.	+INF	0.0586
FR2 .PL12	.	.	+INF	.
FR2 .PL13	.	.	+INF	0.0586
FR3 .PL2	.	.	+INF	0.0612
FR3 .PL3	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PL4	.	.	+INF	0.0943
FR3 .PL5	.	.	+INF	0.0582
FR3 .PL6	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PL7	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PL8	.	.	+INF	0.1692
FR3 .PL9	.	.	+INF	0.1315
FR3 .PL10	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PL11	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PL12	.	.	+INF	0.0656
FR3 .PL13	.	.	+INF	0.0199
FR4 .PL2	.	.	+INF	0.0610
FR4 .PL3	.	.	+INF	0.0198
FR4 .PL4	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PL5	.	.	+INF	0.0580
FR4 .PL6	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PL7	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PL8	.	.	+INF	0.1691
FR4 .PL9	.	.	+INF	0.1313
FR4 .PL10	.	.	+INF	0.0941
FR4 .PL11	.	.	+INF	0.0198
FR4 .PL12	.	.	+INF	0.0273
FR4 .PL13	.	.	+INF	0.0198
FR5 .PL2	.	.	+INF	0.0240
FR5 .PL3	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PL4	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PL5	.	.	+INF	0.0210
FR5 .PL6	.	.	+INF	0.0127
FR5 .PL7	.	.	+INF	0.0121
FR5 .PL8	.	.	+INF	0.1320
FR5 .PL9	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PL10	.	.	+INF	0.0199
FR5 .PL11	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PL12	.	.	+INF	0.1028
FR5 .PL13	.	.	+INF	0.0151
FR6 .PL2	.	.	+INF	0.0219
FR6 .PL3	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PL4	.	.	+INF	0.0179
FR6 .PL5	.	.	+INF	.
FR6 .PL6	.	.	+INF	0.0141
FR6 .PL7	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PL8	.	.	+INF	0.1300
FR6 .PL9	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PL10	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PL11	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PL12	.	.	+INF	0.0636
FR6 .PL13	.	.	+INF	0.0179
FR7 .PL2	.	.	+INF	0.0240

FR7 .PL3	.	.	+INF	0.1687
FR7 .PL4	.	.	+INF	0.0199
FR7 .PL5	.	.	+INF	0.0582
FR7 .PL6	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PL7	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PL8	.	.	+INF	0.1320
FR7 .PL9	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PL10	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PL11	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PL12	.	.	+INF	0.1772
FR7 .PL13	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PL2	.	.	+INF	.
FR8 .PL3	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PL4	.	.	+INF	0.0071
FR8 .PL5	.	.	+INF	0.0210
FR8 .PL6	.	.	+INF	0.0199
FR8 .PL7	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PL8	.	.	+INF	0.0949
FR8 .PL9	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PL10	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PL11	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PL12	.	.	+INF	0.1028
FR8 .PL13	.	.	+INF	0.0571
FR9 .PL2	.	.	+INF	0.0653
FR9 .PL3	.	.	+INF	0.1728
FR9 .PL4	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PL5	.	.	+INF	0.0624
FR9 .PL6	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PL7	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PL8	.	.	+INF	0.0246
FR9 .PL9	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PL10	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PL11	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PL12	.	.	+INF	0.1813
FR9 .PL13	.	.	+INF	0.0984
FR10 .PL2	.	.	+INF	0.0103
FR10 .PL3	.	.	+INF	0.0957
FR10 .PL4	.	.	+INF	0.0174
FR10 .PL5	.	.	+INF	0.0224
FR10 .PL6	.	.	+INF	0.0585
FR10 .PL7	.	.	+INF	0.0585
FR10 .PL8	.	.	+INF	0.0590
FR10 .PL9	.	.	+INF	0.0213
FR10 .PL10	.	.	+INF	0.0957
FR10 .PL11	.	.	+INF	0.0957
FR10 .PL12	.	.	+INF	0.1414
FR10 .PL13	.	.	+INF	0.0585
FR11 .PL2	.	.	+INF	0.0639
FR11 .PL3	.	.	+INF	0.1714
FR11 .PL4	.	.	+INF	0.0971
FR11 .PL5	.	.	+INF	0.0982
FR11 .PL6	.	.	+INF	0.0971
FR11 .PL7	.	.	+INF	0.0971
FR11 .PL8	.	.	+INF	.
FR11 .PL9	.	.	+INF	0.0599
FR11 .PL10	.	.	+INF	0.0971

FR11.PL11	.	.	+INF	0.1343
FR11.PL12	.	.	+INF	0.1800
FR11.PL13	.	.	+INF	0.1343
FR12.PL2	.	.	+INF	0.0247
FR12.PL3	.	.	+INF	0.1322
FR12.PL4	.	.	+INF	0.0206
FR12.PL5	.	.	+INF	0.0589
FR12.PL6	.	.	+INF	0.0578
FR12.PL7	.	.	+INF	0.0578
FR12.PL8	.	.	+INF	0.0212
FR12.PL9	.	.	+INF	0.0147
FR12.PL10	.	.	+INF	0.0950
FR12.PL11	.	.	+INF	0.1322
FR12.PL12	.	.	+INF	0.1407
FR12.PL13	.	.	+INF	0.0578

—— VAR F3 flujo de FR a PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PV1	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PV2	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV3	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV4	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV5	.	.	+INF	0.0148
FR1 .PV6	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV7	.	.	+INF	0.0148
FR1 .PV8	.	.	+INF	0.0010
FR1 .PV9	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV10	.	.	+INF	0.0530
FR1 .PV11	.	.	+INF	0.0593
FR1 .PV12	.	.	+INF	0.0541
FR1 .PV13	.	.	+INF	.
FR1 .PV14	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV15	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PV16	.	.	+INF	.
FR1 .PV17	.	.	+INF	0.1267
FR1 .PV18	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV19	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV20	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PV21	.	.	+INF	0.1635
FR1 .PV22	.	.	+INF	0.1301
FR1 .PV23	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV24	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV25	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PV26	.	.	+INF	0.1263
FR1 .PV27	.	.	+INF	0.0519
FR1 .PV28	.	.	+INF	0.0519
FR2 .PV1	.	.	+INF	0.1702
FR2 .PV2	.	.	+INF	0.0214
FR2 .PV3	.	.	+INF	0.0214
FR2 .PV4	.	.	+INF	0.0207
FR2 .PV5	.	.	+INF	0.0140
FR2 .PV6	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PV7	.	.	+INF	0.0586
FR2 .PV8	.	.	+INF	0.0586

FR2 .PV9	.	.	+INF	0.0586
FR2 .PV10	.	.	+INF	.
FR2 .PV11	.	.	+INF	0.0288
FR2 .PV12	.	.	+INF	0.0608
FR2 .PV13	.	.	+INF	0.0647
FR2 .PV14	.	.	+INF	0.0586
FR2 .PV15	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PV16	.	.	+INF	0.0589
FR2 .PV17	.	.	+INF	0.0961
FR2 .PV18	.	.	+INF	0.0586
FR2 .PV19	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PV20	.	.	+INF	0.1702
FR2 .PV21	.	.	+INF	0.1702
FR2 .PV22	.	.	+INF	0.1368
FR2 .PV23	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PV24	.	.	+INF	0.0958
FR2 .PV25	.	.	+INF	0.2074
FR2 .PV26	.	.	+INF	0.1702
FR2 .PV27	.	.	+INF	0.0214
FR2 .PV28	.	.	+INF	0.0586
FR3 .PV1	.	.	+INF	0.1315
FR3 .PV2	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PV3	.	.	+INF	0.0190
FR3 .PV4	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PV5	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PV6	.	.	+INF	0.0571
FR3 .PV7	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PV8	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PV9	.	.	+INF	0.0004
FR3 .PV10	.	.	+INF	0.0582
FR3 .PV11	.	.	+INF	0.0273
FR3 .PV12	.	.	+INF	0.0221
FR3 .PV13	.	.	+INF	0.0632
FR3 .PV14	.	.	+INF	0.0134
FR3 .PV15	.	.	+INF	0.1687
FR3 .PV16	.	.	+INF	0.0574
FR3 .PV17	.	.	+INF	0.0946
FR3 .PV18	.	.	+INF	0.0184
FR3 .PV19	.	.	+INF	0.0199
FR3 .PV20	.	.	+INF	0.0943
FR3 .PV21	.	.	+INF	0.1315
FR3 .PV22	.	.	+INF	0.0981
FR3 .PV23	.	.	+INF	0.0194
FR3 .PV24	.	.	+INF	0.0188
FR3 .PV25	.	.	+INF	0.1315
FR3 .PV26	.	.	+INF	0.1315
FR3 .PV27	.	.	+INF	0.0197
FR3 .PV28	.	.	+INF	0.0157
FR4 .PV1	.	.	+INF	0.1685
FR4 .PV2	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV3	.	.	+INF	0.0093
FR4 .PV4	.	.	+INF	0.0079
FR4 .PV5	.	.	+INF	0.0194
FR4 .PV6	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV7	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV8	.	.	+INF	0.0569

FR4 .PV9	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV10	.	.	+INF	0.0186
FR4 .PV11	.	.	+INF	.
FR4 .PV12	.	.	+INF	0.0591
FR4 .PV13	.	.	+INF	0.0630
FR4 .PV14	.	.	+INF	0.0114
FR4 .PV15	.	.	+INF	0.1313
FR4 .PV16	.	.	+INF	0.0573
FR4 .PV17	.	.	+INF	0.0573
FR4 .PV18	.	.	+INF	0.0101
FR4 .PV19	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV20	.	.	+INF	0.1313
FR4 .PV21	.	.	+INF	0.1313
FR4 .PV22	.	.	+INF	0.0979
FR4 .PV23	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV24	.	.	+INF	0.0569
FR4 .PV25	.	.	+INF	0.1685
FR4 .PV26	.	.	+INF	0.1313
FR4 .PV27	.	.	+INF	0.0101
FR4 .PV28	.	.	+INF	0.0198
FR5 .PV1	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PV2	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PV3	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV4	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV5	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV6	.	.	+INF	0.0123
FR5 .PV7	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV8	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV9	.	.	+INF	0.0194
FR5 .PV10	.	.	+INF	0.0954
FR5 .PV11	.	.	+INF	0.1017
FR5 .PV12	.	.	+INF	.
FR5 .PV13	.	.	+INF	0.1004
FR5 .PV14	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV15	.	.	+INF	0.2059
FR5 .PV16	.	.	+INF	0.0946
FR5 .PV17	.	.	+INF	0.0575
FR5 .PV18	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV19	.	.	+INF	0.0039
FR5 .PV20	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV21	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PV22	.	.	+INF	0.0609
FR5 .PV23	.	.	+INF	0.0196
FR5 .PV24	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV25	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PV26	.	.	+INF	0.0943
FR5 .PV27	.	.	+INF	0.0571
FR5 .PV28	.	.	+INF	0.0199
FR6 .PV1	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV2	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV3	.	.	+INF	0.0179
FR6 .PV4	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV5	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV6	.	.	+INF	0.0058
FR6 .PV7	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV8	.	.	+INF	0.0550

FR6 .PV9	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV10	.	.	+INF	0.0561
FR6 .PV11	.	.	+INF	0.0253
FR6 .PV12	.	.	+INF	0.0201
FR6 .PV13	.	.	+INF	0.0983
FR6 .PV14	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV15	.	.	+INF	0.1666
FR6 .PV16	.	.	+INF	0.0925
FR6 .PV17	.	.	+INF	0.0182
FR6 .PV18	.	.	+INF	0.0179
FR6 .PV19	.	.	+INF	0.0110
FR6 .PV20	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV21	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV22	.	.	+INF	0.0588
FR6 .PV23	.	.	+INF	0.0550
FR6 .PV24	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV25	.	.	+INF	0.1294
FR6 .PV26	.	.	+INF	0.0922
FR6 .PV27	.	.	+INF	0.0179
FR6 .PV28	.	.	+INF	0.0179
FR7 .PV1	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV2	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV3	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV4	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV5	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV6	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PV7	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV8	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV9	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV10	.	.	+INF	0.1698
FR7 .PV11	.	.	+INF	0.1389
FR7 .PV12	.	.	+INF	0.0593
FR7 .PV13	.	.	+INF	0.1376
FR7 .PV14	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV15	.	.	+INF	0.2802
FR7 .PV16	.	.	+INF	0.1318
FR7 .PV17	.	.	+INF	0.0575
FR7 .PV18	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV19	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PV20	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PV21	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV22	.	.	+INF	0.0609
FR7 .PV23	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV24	.	.	+INF	0.1315
FR7 .PV25	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV26	.	.	+INF	0.0571
FR7 .PV27	.	.	+INF	0.0943
FR7 .PV28	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV1	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV2	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV3	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV4	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV5	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV6	.	.	+INF	0.0199
FR8 .PV7	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV8	.	.	+INF	0.0943

FR8 .PV9	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV10	.	.	+INF	0.0954
FR8 .PV11	.	.	+INF	0.0645
FR8 .PV12	.	.	+INF	0.0593
FR8 .PV13	.	.	+INF	0.1376
FR8 .PV14	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV15	.	.	+INF	0.2059
FR8 .PV16	.	.	+INF	0.0946
FR8 .PV17	.	.	+INF	.
FR8 .PV18	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV19	.	.	+INF	0.0199
FR8 .PV20	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV21	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV22	.	.	+INF	0.0237
FR8 .PV23	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV24	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV25	.	.	+INF	0.0943
FR8 .PV26	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV27	.	.	+INF	0.0571
FR8 .PV28	.	.	+INF	0.0571
FR9 .PV1	.	.	+INF	0.0049
FR9 .PV2	.	.	+INF	0.1728
FR9 .PV3	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV4	.	.	+INF	0.1356
FR9 .PV5	.	.	+INF	0.1356
FR9 .PV6	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PV7	.	.	+INF	0.1356
FR9 .PV8	.	.	+INF	0.1356
FR9 .PV9	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV10	.	.	+INF	0.1739
FR9 .PV11	.	.	+INF	0.1430
FR9 .PV12	.	.	+INF	0.1006
FR9 .PV13	.	.	+INF	0.1417
FR9 .PV14	.	.	+INF	0.1356
FR9 .PV15	.	.	+INF	0.3588
FR9 .PV16	.	.	+INF	0.1359
FR9 .PV17	.	.	+INF	0.0616
FR9 .PV18	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV19	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV20	.	.	+INF	0.0006
FR9 .PV21	.	.	+INF	0.0073
FR9 .PV22	.	.	+INF	0.0279
FR9 .PV23	.	.	+INF	0.0613
FR9 .PV24	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV25	.	.	+INF	0.0109
FR9 .PV26	.	.	+INF	0.0213
FR9 .PV27	.	.	+INF	0.0984
FR9 .PV28	.	.	+INF	0.0984
FR10.PV1	.	.	+INF	0.0213
FR10.PV2	.	.	+INF	0.1329
FR10.PV3	.	.	+INF	0.0585
FR10.PV4	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV5	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV6	.	.	+INF	0.0213
FR10.PV7	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV8	.	.	+INF	0.0957



FR10.PV9	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV10	.	.	+INF	0.1340
FR10.PV11	.	.	+INF	0.1031
FR10.PV12	.	.	+INF	0.0607
FR10.PV13	.	.	+INF	0.1389
FR10.PV14	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV15	.	.	+INF	0.2444
FR10.PV16	.	.	+INF	0.1332
FR10.PV17	.	.	+INF	0.0114
FR10.PV18	.	.	+INF	0.0585
FR10.PV19	.	.	+INF	0.0585
FR10.PV20	.	.	+INF	0.0213
FR10.PV21	.	.	+INF	0.0187
FR10.PV22	.	.	+INF	.
FR10.PV23	.	.	+INF	0.0957
FR10.PV24	.	.	+INF	0.1329
FR10.PV25	.	.	+INF	0.0585
FR10.PV26	.	.	+INF	0.0213
FR10.PV27	.	.	+INF	0.0585
FR10.PV28	.	.	+INF	0.0585
FR11.PV1	.	.	+INF	0.0141
FR11.PV2	.	.	+INF	0.2086
FR11.PV3	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV4	.	.	+INF	0.1714
FR11.PV5	.	.	+INF	0.1714
FR11.PV6	.	.	+INF	0.0971
FR11.PV7	.	.	+INF	0.1714
FR11.PV8	.	.	+INF	0.1714
FR11.PV9	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV10	.	.	+INF	0.1725
FR11.PV11	.	.	+INF	0.1788
FR11.PV12	.	.	+INF	0.1365
FR11.PV13	.	.	+INF	0.1775
FR11.PV14	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV15	.	.	+INF	0.3574
FR11.PV16	.	.	+INF	0.1718
FR11.PV17	.	.	+INF	0.0602
FR11.PV18	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV19	.	.	+INF	0.0971
FR11.PV20	.	.	+INF	0.0227
FR11.PV21	.	.	+INF	0.0166
FR11.PV22	.	.	+INF	0.0637
FR11.PV23	.	.	+INF	0.0971
FR11.PV24	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV25	.	.	+INF	0.0201
FR11.PV26	.	.	+INF	0.0599
FR11.PV27	.	.	+INF	0.1343
FR11.PV28	.	.	+INF	0.1343
FR12.PV1	.	.	+INF	0.0206
FR12.PV2	.	.	+INF	0.1694
FR12.PV3	.	.	+INF	0.0950
FR12.PV4	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV5	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV6	.	.	+INF	0.0578
FR12.PV7	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV8	.	.	+INF	0.1322

FR12.PV9	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV10	.	.	+INF	0.1333
FR12.PV11	.	.	+INF	0.1396
FR12.PV12	.	.	+INF	0.0972
FR12.PV13	.	.	+INF	0.1383
FR12.PV14	.	.	+INF	0.0950
FR12.PV15	.	.	+INF	0.2437
FR12.PV16	.	.	+INF	0.1325
FR12.PV17	.	.	+INF	0.0210
FR12.PV18	.	.	+INF	0.0950
FR12.PV19	.	.	+INF	0.0578
FR12.PV20	.	.	+INF	0.0578
FR12.PV21	.	.	+INF	0.0197
FR12.PV22	.	.	+INF	0.0116
FR12.PV23	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV24	.	.	+INF	0.1322
FR12.PV25	.	.	+INF	0.0578
FR12.PV26	.	.	+INF	0.0578
FR12.PV27	.	.	+INF	0.0950
FR12.PV28	.	.	+INF	0.0950

—— VAR F4 flujo de FR a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	10.6429	+INF	.
FR2 .CA0	.	27.5700	+INF	.
FR3 .CA0	.	.	+INF	0.0008
FR4 .CA0	.	22.0900	+INF	.
FR5 .CA0	.	.	+INF	0.0028
FR6 .CA0	.	.	+INF	0.0001
FR7 .CA0	.	.	+INF	0.0028
FR8 .CA0	.	.	+INF	0.0015
FR9 .CA0	.	.	+INF	0.0057
FR10.CA0	.	.	+INF	0.0036
FR11.CA0	.	.	+INF	0.0049
FR12.CA0	.	.	+INF	0.0049

—— VAR F5 flujo de FR a ET

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	16.7471	+INF	.
FR2 .ET0	.	.	+INF	0.0043
FR3 .ET0	.	22.2600	+INF	.
FR4 .ET0	.	.	+INF	0.0019
FR5 .ET0	.	23.0000	+INF	.
FR6 .ET0	.	22.9100	+INF	.
FR7 .ET0	.	17.0800	+INF	.
FR8 .ET0	.	16.9700	+INF	.
FR9 .ET0	.	10.5800	+INF	.
FR10.ET0	.	10.7500	+INF	.
FR11.ET0	.	14.7500	+INF	.
FR12.ET0	.	14.6800	+INF	.

—— VAR F6 flujo de PLA a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	+INF	0.0088
—— VAR F7 flujo de PLN a CA				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	+INF	0.0047
PL3 .CA0	.	.	+INF	0.0068
PL4 .CA0	.	.	+INF	0.0088
PL5 .CA0	.	.	+INF	0.0070
PL6 .CA0	.	.	+INF	0.0088
PL7 .CA0	.	.	+INF	0.0088
PL8 .CA0	.	.	+INF	0.0102
PL9 .CA0	.	.	+INF	0.0094
PL10.CA0	.	.	+INF	0.0088
PL11.CA0	.	.	+INF	0.0074
PL12.CA0	.	.	+INF	.
PL13.CA0	.	.	+INF	0.0081
—— VAR F8 flujo de CA a ET				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	6.0303	+INF	.
—— VAR F9 flujo de ET a RS				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	175.7574	+INF	.
—— VAR F10 flujo de CA a P1				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT01	.	54.2726	+INF	.
—— VAR F11 flujo de CA a P2				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT02	.	.	+INF	0.0508
—— VAR F12 flujo de CA a P3				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT03	.	.	+INF	2.4857021E-5
—— VAR F13 flujo de PV a CA				

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	+INF	0.0101
PV2 .CA0	.	.	+INF	0.0068
PV3 .CA0	.	.	+INF	0.0074
PV4 .CA0	.	.	+INF	0.0074
PV5 .CA0	.	.	+INF	0.0074
PV6 .CA0	.	.	+INF	0.0081
PV7 .CA0	.	.	+INF	0.0081
PV8 .CA0	.	.	+INF	0.0074
PV9 .CA0	.	.	+INF	0.0081
PV10.CA0	.	.	+INF	0.0057
PV11.CA0	.	.	+INF	3.8618215E-5
PV12.CA0	.	.	+INF	0.0059
PV13.CA0	.	.	+INF	0.0014
PV14.CA0	.	.	+INF	0.0074
PV15.CA0	.	.	+INF	0.0068
PV16.CA0	.	.	+INF	0.0071
PV17.CA0	.	.	+INF	0.0084
PV18.CA0	.	.	+INF	0.0074
PV19.CA0	.	.	+INF	0.0081
PV20.CA0	.	.	+INF	0.0101
PV21.CA0	.	.	+INF	0.0101
PV22.CA0	.	.	+INF	0.0056
PV23.CA0	.	.	+INF	0.0088
PV24.CA0	.	.	+INF	0.0081
PV25.CA0	.	.	+INF	0.0101
PV26.CA0	.	.	+INF	0.0101
PV27.CA0	.	.	+INF	0.0074
PV28.CA0	.	.	+INF	0.0074

—— VAR A

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2	.	.	1.0000	3.7576
PL3	.	.	1.0000	3.7576
PL4	.	.	1.0000	3.7576
PL5	.	.	1.0000	3.7576
PL6	.	.	1.0000	3.7576
PL7	.	.	1.0000	3.7576
PL8	.	.	1.0000	3.7576
PL9	.	.	1.0000	3.7576
PL10	.	.	1.0000	3.7576
PL11	.	.	1.0000	3.7576
PL12	.	.	1.0000	3.7576
PL13	.	.	1.0000	3.7576

—— VAR B

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT02	.	.	1.0000	32155.5613

—— VAR C

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT03	.	.	1.0000	98.7172
—— VAR E1				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR2 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR4 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR10.CA0	.	.	1.0000	EPS
FR11.CA0	.	.	1.0000	EPS
FR12.CA0	.	.	1.0000	EPS
—— VAR E2				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR2 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR3 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR4 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR5 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR6 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR7 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR8 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR10.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR11.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR12.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
—— VAR E3				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	1.0000	EPS
—— VAR E4				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL8 .CA0	.	.	1.0000	EPS

PL9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL12 .CA0	.	.	1.0000	-1.796940E+6
PL13 .CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E5

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E6

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E7

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV12 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV13 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV14 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV15 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV16 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV17 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV18 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV19 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV20 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV21 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV22 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV23 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV24 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV25 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV26 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV27 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV28 .CA0	.	.	1.0000	EPS

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
—— VAR C01	-INF	2196967.2650	+INF	.
—— VAR C02	-INF	355787.1677	+INF	.

```

—— VAR C03          -INF      2985307.1980      +INF      .
—— VAR C04          -INF      1139724.9947      +INF      .
—— VAR C05          -INF      .                +INF      .
—— VAR F01          -INF      6677786.6255      +INF      .
—— VAR F02          -INF      8997444.1359      +INF      .
—— VAR gamma        -INF      0.9145           +INF      .

**** REPORT SUMMARY :           0      NONOPT
                                0      INFEASIBLE
                                0      UNBOUNDED
                                12     PROJECTED

EXECUTION TIME      =           0.000 SECONDS      2 MB  28.1.0  r5b48834 WEX-WEI

```

### Resultados principales

Para este primer problema se seleccionó el óptimo alcanzado al otorgar 50% de importancia tanto a la función objetivo de costos como a la de puntaje ambiental. A continuación se presentarán los valores de los flujos obtenidos para la configuración de este primer problema.

Notar que si las casillas están vacías, significa que el flujo es igual a 0 toneladas mensuales.

Tabla D.6: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 1, en toneladas por mes.

PL ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PL1												
PL2												
PL3												
PL4												
PL5												
PL6												
PL7												
PL8												
PL9												
PL10												
PL11												
PL12												
PL13												
PL14												

Tabla D.7: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 1, en toneladas por mes.

PV←FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PV1												
PV2												
PV3												
PV4												
PV5												
PV6												
PV7												
PV8												
PV9												
PV10												
PV11												
PV12												
PV13												
PV14												
PV15												
PV16												
PV17												
PV18												
PV19												
PV20												
PV21												
PV22												
PV23												
PV24												
PV25												
PV26												
PV27												
PV28												

Tabla D.8: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 1.

Destino ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
CA0	10,64	27,57		22,09								
ET0	16,75		22,26		23,00	22,91	17,08	16,97	10,58	10,75	14,75	14,68

Tabla D.9: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 1.

CA → PT	PT01	PT02	PT03
CA0	54,27		

Tabla D.10: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 1.

CA → ET	ET0
CA0	6,03



Tabla D.11: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 1.

<b>ET → RS</b>	<b>RS0</b>
<b>ET0</b>	175,76

## D.2.2. Problema 2

### Documento entregado por GAMS

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 06:22:45 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation
```

```
COMPILE TIME = 0.000 SECONDS 3 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 06:22:45 Page 2
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	51	SINGLE EQUATIONS	280
BLOCKS OF VARIABLES	33	SINGLE VARIABLES	653
NON ZERO ELEMENTS	3,505	DISCRETE VARIABLES	82

```
GENERATION TIME = 0.032 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
EXECUTION TIME = 0.032 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 06:22:45 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### S O L V E S U M M A R Y

MODEL	MEMORIA	OBJECTIVE	gamma
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	464

```
**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE 0.3240
```

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.047	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	253	2000000000

IBM ILOG CPLEX 28.1.0 r5b48834 Released Aug 02, 2019 WEI x86 64bit/MS Window  
 — GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
 Cplex 12.9.0.0

Space for names approximately 0.02 Mb  
 Use option 'names no' to turn use of names off  
 MIP status(101): integer optimal solution  
 Cplex Time: 0.03sec (det. 13.52 ticks)  
 Fixing integer variables, and solving final LP...  
 Fixed MIP status(1): optimal  
 Cplex Time: 0.00sec (det. 1.58 ticks)  
 Proven optimal solution.

MIP Solution: 0.323955 (162 iterations, 0 nodes)  
 Final Solve: 0.323955 (91 iterations)  
 Best possible: 0.323955  
 Absolute gap: 0.000000  
 Relative gap: 0.000000

— VAR F1 flujo de FR a PLA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL1	.	.	+INF	.
FR2 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL1	.	.	+INF	EPS
FR12 .PL1	.	.	+INF	EPS

— VAR F2 flujo de FR a PLN

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL2	.	.	+INF	.
FR1 .PL3	.	.	+INF	.
FR1 .PL4	.	.	+INF	.
FR1 .PL5	.	.	+INF	.
FR1 .PL6	.	.	+INF	.
FR1 .PL7	.	.	+INF	.
FR1 .PL8	.	.	+INF	.
FR1 .PL9	.	.	+INF	.
FR1 .PL10	.	.	+INF	.
FR1 .PL11	.	.	+INF	.
FR1 .PL12	.	.	+INF	.
FR1 .PL13	.	.	+INF	.
FR2 .PL2	.	.	+INF	EPS

FR2 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR2 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR3 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR4 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR5 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL10	.	.	+INF	EPS

FR6 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR6 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR7 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR8 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR9 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL6	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL7	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL8	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL9	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL10	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL11	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL12	.	.	+INF	EPS
FR10 .PL13	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL2	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL3	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL4	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL5	.	.	+INF	EPS
FR11 .PL6	.	.	+INF	EPS

FR11.PL7	.	.	+INF	EPS
FR11.PL8	.	.	+INF	EPS
FR11.PL9	.	.	+INF	EPS
FR11.PL10	.	.	+INF	EPS
FR11.PL11	.	.	+INF	EPS
FR11.PL12	.	.	+INF	EPS
FR11.PL13	.	.	+INF	EPS
FR12.PL2	.	.	+INF	EPS
FR12.PL3	.	.	+INF	EPS
FR12.PL4	.	.	+INF	EPS
FR12.PL5	.	.	+INF	EPS
FR12.PL6	.	.	+INF	EPS
FR12.PL7	.	.	+INF	EPS
FR12.PL8	.	.	+INF	EPS
FR12.PL9	.	.	+INF	EPS
FR12.PL10	.	.	+INF	EPS
FR12.PL11	.	.	+INF	EPS
FR12.PL12	.	.	+INF	EPS
FR12.PL13	.	.	+INF	EPS

—— VAR F3 flujo de FR a PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1.PV1	.	.	+INF	.
FR1.PV2	.	.	+INF	.
FR1.PV3	.	.	+INF	EPS
FR1.PV4	.	.	+INF	EPS
FR1.PV5	.	.	+INF	EPS
FR1.PV6	.	.	+INF	EPS
FR1.PV7	.	.	+INF	.
FR1.PV8	.	.	+INF	EPS
FR1.PV9	.	.	+INF	EPS
FR1.PV10	.	.	+INF	.
FR1.PV11	.	.	+INF	EPS
FR1.PV12	.	.	+INF	.
FR1.PV13	.	.	+INF	EPS
FR1.PV14	.	.	+INF	EPS
FR1.PV15	.	.	+INF	.
FR1.PV16	.	.	+INF	EPS
FR1.PV17	.	.	+INF	EPS
FR1.PV18	.	.	+INF	EPS
FR1.PV19	.	.	+INF	EPS
FR1.PV20	.	.	+INF	EPS
FR1.PV21	.	.	+INF	.
FR1.PV22	.	.	+INF	EPS
FR1.PV23	.	.	+INF	EPS
FR1.PV24	.	.	+INF	EPS
FR1.PV25	.	.	+INF	.
FR1.PV26	.	.	+INF	.
FR1.PV27	.	.	+INF	EPS
FR1.PV28	.	.	+INF	EPS
FR2.PV1	.	.	+INF	EPS
FR2.PV2	.	.	+INF	EPS
FR2.PV3	.	.	+INF	EPS
FR2.PV4	.	.	+INF	EPS

FR2 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV17	.	.	+INF	.
FR2 .PV18	.	0.0440	+INF	.
FR2 .PV19	.	0.0440	+INF	.
FR2 .PV20	.	0.0440	+INF	.
FR2 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV23	.	.	+INF	.
FR2 .PV24	.	0.0440	+INF	.
FR2 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR2 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV3	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV4	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV8	.	.	+INF	.
FR3 .PV9	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV11	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV13	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV14	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV16	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV22	.	0.0440	+INF	.
FR3 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR3 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV4	.	.	+INF	EPS

FR4 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV6	.	.	+INF	.
FR4 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR4 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV4	.	0.0440	+INF	.
FR5 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR5 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV4	.	.	+INF	EPS

FR6 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR6 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV4	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR7 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV4	.	.	+INF	EPS



FR8 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR8 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV1	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV2	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV3	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV4	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV5	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV6	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV7	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV8	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV9	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV10	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV11	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV12	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV13	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV14	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV15	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV16	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV17	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV18	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV19	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV20	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV21	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV22	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV23	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV24	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV25	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV26	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV27	.	.	+INF	EPS
FR9 .PV28	.	.	+INF	EPS
FR10.PV1	.	.	+INF	EPS
FR10.PV2	.	.	+INF	EPS
FR10.PV3	.	.	+INF	EPS
FR10.PV4	.	.	+INF	EPS

FR10.PV5	.	0.0440	+INF	.
FR10.PV6	.	.	+INF	EPS
FR10.PV7	.	.	+INF	EPS
FR10.PV8	.	.	+INF	EPS
FR10.PV9	.	.	+INF	EPS
FR10.PV10	.	.	+INF	EPS
FR10.PV11	.	.	+INF	EPS
FR10.PV12	.	.	+INF	EPS
FR10.PV13	.	.	+INF	EPS
FR10.PV14	.	.	+INF	EPS
FR10.PV15	.	.	+INF	EPS
FR10.PV16	.	.	+INF	EPS
FR10.PV17	.	.	+INF	EPS
FR10.PV18	.	.	+INF	EPS
FR10.PV19	.	.	+INF	EPS
FR10.PV20	.	.	+INF	EPS
FR10.PV21	.	.	+INF	EPS
FR10.PV22	.	.	+INF	EPS
FR10.PV23	.	.	+INF	EPS
FR10.PV24	.	.	+INF	EPS
FR10.PV25	.	.	+INF	EPS
FR10.PV26	.	.	+INF	EPS
FR10.PV27	.	.	+INF	EPS
FR10.PV28	.	.	+INF	EPS
FR11.PV1	.	.	+INF	EPS
FR11.PV2	.	.	+INF	EPS
FR11.PV3	.	.	+INF	EPS
FR11.PV4	.	.	+INF	EPS
FR11.PV5	.	.	+INF	EPS
FR11.PV6	.	.	+INF	EPS
FR11.PV7	.	.	+INF	EPS
FR11.PV8	.	.	+INF	EPS
FR11.PV9	.	.	+INF	EPS
FR11.PV10	.	.	+INF	EPS
FR11.PV11	.	.	+INF	EPS
FR11.PV12	.	.	+INF	EPS
FR11.PV13	.	.	+INF	EPS
FR11.PV14	.	.	+INF	EPS
FR11.PV15	.	.	+INF	EPS
FR11.PV16	.	.	+INF	EPS
FR11.PV17	.	.	+INF	EPS
FR11.PV18	.	.	+INF	EPS
FR11.PV19	.	.	+INF	EPS
FR11.PV20	.	.	+INF	EPS
FR11.PV21	.	.	+INF	EPS
FR11.PV22	.	.	+INF	EPS
FR11.PV23	.	.	+INF	EPS
FR11.PV24	.	.	+INF	EPS
FR11.PV25	.	.	+INF	EPS
FR11.PV26	.	.	+INF	EPS
FR11.PV27	.	.	+INF	.
FR11.PV28	.	0.0440	+INF	.
FR12.PV1	.	.	+INF	EPS
FR12.PV2	.	.	+INF	EPS
FR12.PV3	.	.	+INF	EPS
FR12.PV4	.	.	+INF	EPS

FR12.PV5	.	.	+INF	EPS
FR12.PV6	.	.	+INF	EPS
FR12.PV7	.	.	+INF	EPS
FR12.PV8	.	.	+INF	EPS
FR12.PV9	.	.	+INF	EPS
FR12.PV10	.	.	+INF	EPS
FR12.PV11	.	.	+INF	EPS
FR12.PV12	.	.	+INF	EPS
FR12.PV13	.	.	+INF	EPS
FR12.PV14	.	.	+INF	EPS
FR12.PV15	.	.	+INF	EPS
FR12.PV16	.	.	+INF	EPS
FR12.PV17	.	.	+INF	EPS
FR12.PV18	.	.	+INF	EPS
FR12.PV19	.	.	+INF	EPS
FR12.PV20	.	.	+INF	EPS
FR12.PV21	.	.	+INF	EPS
FR12.PV22	.	.	+INF	EPS
FR12.PV23	.	.	+INF	EPS
FR12.PV24	.	.	+INF	EPS
FR12.PV25	.	.	+INF	EPS
FR12.PV26	.	.	+INF	EPS
FR12.PV27	.	.	+INF	EPS
FR12.PV28	.	.	+INF	EPS

—— VAR F4 flujo de FR a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	27.3900	+INF	.
FR2 .CA0	.	27.3940	+INF	.
FR3 .CA0	.	21.9520	+INF	.
FR4 .CA0	.	22.0900	+INF	.
FR5 .CA0	.	22.9560	+INF	.
FR6 .CA0	.	22.9100	+INF	.
FR7 .CA0	.	17.0800	+INF	.
FR8 .CA0	.	16.9700	+INF	.
FR9 .CA0	.	10.5800	+INF	.
FR10.CA0	.	10.7060	+INF	.
FR11.CA0	.	14.7060	+INF	.
FR12.CA0	.	14.6800	+INF	.

—— VAR F5 flujo de FR a ET

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR2 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR3 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR4 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR5 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR6 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR7 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR8 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR9 .ET0	.	.	+INF	EPS
FR10.ET0	.	.	+INF	EPS

FR11.ET0	.	.	+INF	EPS
FR12.ET0	.	.	+INF	EPS
— VAR F6	flujo de PLA a CA			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	+INF	EPS
— VAR F7	flujo de PLN a CA			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL3 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL4 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL5 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL6 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL7 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL8 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL9 .CA0	.	.	+INF	EPS
PL10.CA0	.	.	+INF	EPS
PL11.CA0	.	.	+INF	EPS
PL12.CA0	.	.	+INF	EPS
PL13.CA0	.	.	+INF	EPS
— VAR F8	flujo de CA a ET			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	30.0300	+INF	.
— VAR F9	flujo de ET a RS			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	30.0300	+INF	.
— VAR F10	flujo de CA a P1			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT01	.	100.0000	+INF	.
— VAR F11	flujo de CA a P2			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT02	.	.	+INF	.
— VAR F12	flujo de CA a P3			
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT03	.	100.0000	+INF	.

—— VAR F13 flujo de PV a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	+INF	EPS
PV2 .CA0	.	.	+INF	EPS
PV3 .CA0	.	0.0440	+INF	.
PV4 .CA0	.	0.0440	+INF	.
PV5 .CA0	.	0.0440	+INF	.
PV6 .CA0	.	.	+INF	.
PV7 .CA0	.	.	+INF	EPS
PV8 .CA0	.	.	+INF	.
PV9 .CA0	.	0.0440	+INF	.
PV10.CA0	.	.	+INF	EPS
PV11.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV12.CA0	.	.	+INF	EPS
PV13.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV14.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV15.CA0	.	.	+INF	EPS
PV16.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV17.CA0	.	.	+INF	.
PV18.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV19.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV20.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV21.CA0	.	.	+INF	EPS
PV22.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV23.CA0	.	.	+INF	.
PV24.CA0	.	0.0440	+INF	.
PV25.CA0	.	.	+INF	EPS
PV26.CA0	.	.	+INF	EPS
PV27.CA0	.	.	+INF	.
PV28.CA0	.	0.0440	+INF	.

—— VAR A

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2	.	.	1.0000	EPS
PL3	.	.	1.0000	EPS
PL4	.	.	1.0000	EPS
PL5	.	.	1.0000	EPS
PL6	.	.	1.0000	EPS
PL7	.	.	1.0000	EPS
PL8	.	.	1.0000	EPS
PL9	.	.	1.0000	EPS
PL10	.	.	1.0000	EPS
PL11	.	.	1.0000	EPS
PL12	.	.	1.0000	EPS
PL13	.	.	1.0000	EPS

—— VAR B

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT02	.	.	1.0000	-8.672869E+6

—— VAR C

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT03	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E1

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR2 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR3 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR4 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR5 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR6 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR7 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR8 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR10 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR11 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR12 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E2

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR2 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR3 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR4 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR5 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR6 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR7 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR8 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR9 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR10 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR11 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR12 .ET0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E3

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1 .CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E4

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL6 .CA0	.	.	1.0000	EPS

PL7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL10.CA0	.	.	1.0000	EPS
PL11.CA0	.	.	1.0000	EPS
PL12.CA0	.	.	1.0000	EPS
PL13.CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E5

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E6

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E7

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV3 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV4 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV5 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV6 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV8 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV9 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV10.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV11.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV12.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV13.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV14.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV15.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV16.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV17.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV18.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV19.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV20.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV21.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV22.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV23.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV24.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV25.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV26.CA0	.	.	1.0000	EPS
PV27.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
PV28.CA0	.	1.0000	1.0000	EPS

MARGINAL                      LOWER                      LEVEL                      UPPER

```

—— VAR C01          -INF          375375.0000          +INF          .
—— VAR C02          -INF          1357177.0000          +INF          .
—— VAR C03          -INF          1611519.4786          +INF          .
—— VAR C04          -INF          3040000.0000          +INF          .
—— VAR C05          -INF          3.9439040E+7          +INF          .
—— VAR F01          -INF          4.5823112E+7          +INF          .
—— VAR F02          -INF          4845481.8937          +INF          .
—— VAR gamma        -INF              0.3240          +INF          .

**** REPORT SUMMARY :           0      NONOPT
                                0 INFEASIBLE
                                0 UNBOUNDED
                                12 PROJECTED

EXECUTION TIME      =           0.000 SECONDS      2 MB  28.1.0  r5b48834 WEX-WEI

```

## Resultados principales

Para este problema se seleccionó el óptimo alcanzado al otorgar 50 % de importancia tanto a la función objetivo de costos como a la de puntaje ambiental. A continuación se presentarán los valores de los flujos obtenidos para la configuración de este primer problema. Notar que si las casillas están vacías, significa que el flujo es igual a 0 toneladas mensuales.

Tabla D.12: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 2, en toneladas por mes.

PL ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PL1												
PL2												
PL3												
PL4												
PL5												
PL6												
PL7												
PL8												
PL9												
PL10												
PL11												
PL12												
PL13												
PL14												



Tabla D.13: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 2, en toneladas por mes.

PV←FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PV1												
PV2												
PV3			0,044									
PV4					0,044							
PV5										0,044		
PV6												
PV7												
PV8												
PV9			0,044									
PV10												
PV11			0,044									
PV12												
PV13			0,044									
PV14			0,044									
PV15												
PV16			0,044									
PV17												
PV18		0,044										
PV19		0,044										
PV20		0,044										
PV21												
PV22			0,044									
PV23												
PV24		0,044										
PV25												
PV26												
PV27												
PV28											0,044	

Tabla D.14: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 2.

Destino ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
CA0	27,39	27,39	21,95	22,09	22,95	22,91	17,08	16,97	10,58	10,71	14,71	14,68
ET0												

Tabla D.15: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 2.

CA → PT	PT01	PT02	PT03
CA0	100		100

Tabla D.16: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 2.

CA → ET	ET0
CA0	30,03

Tabla D.17: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 2.

ET → RS	RS0
ET0	30,03

### D.2.3. Problema 3

#### Documento entregado por GAMS

GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows – 09/11/19 06:48:25 Page 1 General Algebraic Modeling System Compilation			
COMPILATION TIME	=	0.016 SECONDS	3 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows – 09/11/19 06:48:25 Page 2 General Algebraic Modeling System Model Statistics SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464			
MODEL STATISTICS			
BLOCKS OF EQUATIONS	51	SINGLE EQUATIONS	280
BLOCKS OF VARIABLES	33	SINGLE VARIABLES	653
NON ZERO ELEMENTS	3,505	DISCRETE VARIABLES	82
GENERATION TIME	=	0.000 SECONDS	4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
EXECUTION TIME	=	0.000 SECONDS	4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows – 09/11/19 06:48:25 Page 3 General Algebraic Modeling System Solution Report SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464			
S O L V E S U M M A R Y			
MODEL	MEMORIA	OBJECTIVE	gamma
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	464
**** SOLVER STATUS	1	Normal Completion	
**** MODEL STATUS	1	Optimal	
**** OBJECTIVE VALUE		0.8925	
RESOURCE USAGE, LIMIT	0.016	1000.000	
ITERATION COUNT, LIMIT	109	2000000000	

IBM ILOG CPLEX 28.1.0 r5b48834 Released Aug 02, 2019 WEI x86 64bit/MS Window  
 — GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
 Cplex 12.9.0.0

Space for names approximately 0.02 Mb  
 Use option 'names no' to turn use of names off  
 MIP status(101): integer optimal solution  
 Cplex Time: 0.02sec (det. 10.07 ticks)  
 Fixing integer variables, and solving final LP...  
 Fixed MIP status(1): optimal  
 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.69 ticks)  
 Proven optimal solution.

MIP Solution: 0.892478 (105 iterations, 0 nodes)  
 Final Solve: 0.892478 (4 iterations)  
 Best possible: 0.892478  
 Absolute gap: 0.000000  
 Relative gap: 0.000000

— VAR F1 flujo de FR a PLA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL1	.	.	+INF	0.0508
FR2 .PL1	.	.	+INF	0.0386
FR3 .PL1	.	.	+INF	0.0377
FR4 .PL1	.	.	+INF	0.0232
FR5 .PL1	.	.	+INF	0.0227
FR6 .PL1	.	.	+INF	0.0057
FR7 .PL1	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL1	.	.	+INF	0.0079
FR9 .PL1	.	.	+INF	0.0391
FR10 .PL1	.	.	+INF	0.0232
FR11 .PL1	.	.	+INF	0.0533
FR12 .PL1	.	.	+INF	0.0377

— VAR F2 flujo de FR a PLN

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL2	.	.	+INF	0.0376
FR1 .PL3	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PL4	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PL5	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL6	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL7	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL8	.	.	+INF	0.0657
FR1 .PL9	.	.	+INF	0.0655
FR1 .PL10	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL11	.	.	+INF	0.0036
FR1 .PL12	.	.	+INF	0.0240
FR1 .PL13	.	.	+INF	0.0212
FR2 .PL2	.	.	+INF	0.0402

FR2 .PL3	.	.	+INF	0.0006
FR2 .PL4	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL5	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PL6	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL7	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL8	.	.	+INF	0.0832
FR2 .PL9	.	.	+INF	0.0534
FR2 .PL10	.	.	+INF	0.0534
FR2 .PL11	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PL12	.	.	+INF	.
FR2 .PL13	.	.	+INF	0.0239
FR3 .PL2	.	.	+INF	0.0246
FR3 .PL3	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL4	.	.	+INF	0.0377
FR3 .PL5	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL6	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL7	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL8	.	.	+INF	0.0675
FR3 .PL9	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PL10	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL11	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PL12	.	.	+INF	0.0257
FR3 .PL13	.	.	+INF	0.0082
FR4 .PL2	.	.	+INF	0.0248
FR4 .PL3	.	.	+INF	0.0084
FR4 .PL4	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL5	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL6	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL7	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL8	.	.	+INF	0.0677
FR4 .PL9	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PL10	.	.	+INF	0.0380
FR4 .PL11	.	.	+INF	0.0084
FR4 .PL12	.	.	+INF	0.0109
FR4 .PL13	.	.	+INF	0.0084
FR5 .PL2	.	.	+INF	0.0095
FR5 .PL3	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PL4	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PL5	.	.	+INF	0.0079
FR5 .PL6	.	.	+INF	0.0050
FR5 .PL7	.	.	+INF	0.0048
FR5 .PL8	.	.	+INF	0.0524
FR5 .PL9	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PL10	.	.	+INF	0.0079
FR5 .PL11	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PL12	.	.	+INF	0.0402
FR5 .PL13	.	.	+INF	0.0060
FR6 .PL2	.	.	+INF	0.0093
FR6 .PL3	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL4	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PL5	.	.	+INF	0.0001
FR6 .PL6	.	.	+INF	0.0062
FR6 .PL7	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL8	.	.	+INF	0.0522
FR6 .PL9	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL10	.	.	+INF	0.0224

FR6 .PL11	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL12	.	.	+INF	0.0252
FR6 .PL13	.	.	+INF	0.0076
FR7 .PL2	.	.	+INF	0.0095
FR7 .PL3	.	.	+INF	0.0670
FR7 .PL4	.	.	+INF	0.0079
FR7 .PL5	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL6	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL7	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL8	.	.	+INF	0.0524
FR7 .PL9	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL10	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL11	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL12	.	.	+INF	0.0698
FR7 .PL13	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL2	.	.	+INF	.
FR8 .PL3	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL4	.	.	+INF	0.0028
FR8 .PL5	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PL6	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PL7	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL8	.	.	+INF	0.0377
FR8 .PL9	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL10	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL11	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL12	.	.	+INF	0.0402
FR8 .PL13	.	.	+INF	0.0227
FR9 .PL2	.	.	+INF	0.0259
FR9 .PL3	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PL4	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL5	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL6	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PL7	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL8	.	.	+INF	0.0098
FR9 .PL9	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL10	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL11	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PL12	.	.	+INF	0.0714
FR9 .PL13	.	.	+INF	0.0391
FR10 .PL2	.	.	+INF	0.0041
FR10 .PL3	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL4	.	.	+INF	0.0069
FR10 .PL5	.	.	+INF	0.0085
FR10 .PL6	.	.	+INF	0.0232
FR10 .PL7	.	.	+INF	0.0232
FR10 .PL8	.	.	+INF	0.0234
FR10 .PL9	.	.	+INF	0.0085
FR10 .PL10	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL11	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL12	.	.	+INF	0.0555
FR10 .PL13	.	.	+INF	0.0232
FR11 .PL2	.	.	+INF	0.0254
FR11 .PL3	.	.	+INF	0.0681
FR11 .PL4	.	.	+INF	0.0385
FR11 .PL5	.	.	+INF	0.0385
FR11 .PL6	.	.	+INF	0.0385

FR11.PL7	.	.	+INF	0.0385
FR11.PL8	.	.	+INF	.
FR11.PL9	.	.	+INF	0.0238
FR11.PL10	.	.	+INF	0.0385
FR11.PL11	.	.	+INF	0.0533
FR11.PL12	.	.	+INF	0.0709
FR11.PL13	.	.	+INF	0.0533
FR12.PL2	.	.	+INF	0.0098
FR12.PL3	.	.	+INF	0.0525
FR12.PL4	.	.	+INF	0.0082
FR12.PL5	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL6	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL7	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL8	.	.	+INF	0.0084
FR12.PL9	.	.	+INF	0.0058
FR12.PL10	.	.	+INF	0.0377
FR12.PL11	.	.	+INF	0.0525
FR12.PL12	.	.	+INF	0.0553
FR12.PL13	.	.	+INF	0.0230

— VAR F3 flujo de FR a PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PV1	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV2	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV3	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV4	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV5	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PV6	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV7	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PV8	.	.	+INF	0.0010
FR1 .PV9	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV10	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV11	.	.	+INF	0.0236
FR1 .PV12	.	.	+INF	0.0221
FR1 .PV13	.	.	+INF	.
FR1 .PV14	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV15	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV16	.	.	+INF	0.0005
FR1 .PV17	.	.	+INF	0.0509
FR1 .PV18	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV19	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV20	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV21	.	.	+INF	0.0655
FR1 .PV22	.	.	+INF	0.0523
FR1 .PV23	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV24	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV25	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV26	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV27	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV28	.	.	+INF	0.0212
FR2 .PV1	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV2	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV3	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV4	.	.	+INF	0.0088

FR2 .PV5	.	.	+INF	0.0062
FR2 .PV6	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV7	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV8	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV9	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV10	.	.	+INF	0.0002
FR2 .PV11	.	.	+INF	0.0114
FR2 .PV12	.	.	+INF	0.0247
FR2 .PV13	.	.	+INF	0.0257
FR2 .PV14	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV15	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV16	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV17	.	.	+INF	0.0388
FR2 .PV18	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV19	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV20	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV21	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV22	.	.	+INF	0.0549
FR2 .PV23	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV24	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV25	.	.	+INF	0.0829
FR2 .PV26	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV27	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV28	.	.	+INF	0.0239
FR3 .PV1	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV2	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV3	.	.	+INF	0.0078
FR3 .PV4	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV5	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV6	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV7	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV8	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV9	.	.	+INF	0.0004
FR3 .PV10	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV11	.	.	+INF	0.0105
FR3 .PV12	.	.	+INF	0.0091
FR3 .PV13	.	.	+INF	0.0248
FR3 .PV14	.	.	+INF	0.0056
FR3 .PV15	.	.	+INF	0.0672
FR3 .PV16	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV17	.	.	+INF	0.0378
FR3 .PV18	.	.	+INF	0.0076
FR3 .PV19	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV20	.	.	+INF	0.0377
FR3 .PV21	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV22	.	.	+INF	0.0392
FR3 .PV23	.	.	+INF	0.0080
FR3 .PV24	.	.	+INF	0.0077
FR3 .PV25	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV26	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV27	.	.	+INF	0.0081
FR3 .PV28	.	.	+INF	0.0065
FR4 .PV1	.	.	+INF	0.0675
FR4 .PV2	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV3	.	.	+INF	0.0043
FR4 .PV4	.	.	+INF	0.0037

FR4 .PV5	.	.	+INF	0.0083
FR4 .PV6	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV7	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV8	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV9	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV10	.	.	+INF	0.0076
FR4 .PV11	.	.	+INF	.
FR4 .PV12	.	.	+INF	0.0241
FR4 .PV13	.	.	+INF	0.0250
FR4 .PV14	.	.	+INF	0.0051
FR4 .PV15	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV16	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV17	.	.	+INF	0.0233
FR4 .PV18	.	.	+INF	0.0046
FR4 .PV19	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV20	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV21	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV22	.	.	+INF	0.0395
FR4 .PV23	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV24	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV25	.	.	+INF	0.0675
FR4 .PV26	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV27	.	.	+INF	0.0046
FR4 .PV28	.	.	+INF	0.0084
FR5 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV2	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV3	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV4	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV5	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV6	.	.	+INF	0.0049
FR5 .PV7	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV8	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV9	.	.	+INF	0.0077
FR5 .PV10	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV11	.	.	+INF	0.0398
FR5 .PV12	.	.	+INF	.
FR5 .PV13	.	.	+INF	0.0393
FR5 .PV14	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV15	.	.	+INF	0.0817
FR5 .PV16	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV17	.	.	+INF	0.0228
FR5 .PV18	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV19	.	.	+INF	0.0016
FR5 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV21	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV22	.	.	+INF	0.0242
FR5 .PV23	.	.	+INF	0.0078
FR5 .PV24	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV26	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV27	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV28	.	.	+INF	0.0079
FR6 .PV1	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV2	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV3	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV4	.	.	+INF	0.0224



FR6 .PV5	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV6	.	.	+INF	0.0028
FR6 .PV7	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV8	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV9	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV10	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV11	.	.	+INF	0.0100
FR6 .PV12	.	.	+INF	0.0085
FR6 .PV13	.	.	+INF	0.0390
FR6 .PV14	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV15	.	.	+INF	0.0667
FR6 .PV16	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV17	.	.	+INF	0.0078
FR6 .PV18	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV19	.	.	+INF	0.0049
FR6 .PV20	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV21	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV22	.	.	+INF	0.0239
FR6 .PV23	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV24	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV25	.	.	+INF	0.0519
FR6 .PV26	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV27	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV28	.	.	+INF	0.0076
FR7 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV2	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV3	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV4	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV5	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV6	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV7	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV8	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV9	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV10	.	.	+INF	0.0670
FR7 .PV11	.	.	+INF	0.0546
FR7 .PV12	.	.	+INF	0.0236
FR7 .PV13	.	.	+INF	0.0540
FR7 .PV14	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV15	.	.	+INF	0.1113
FR7 .PV16	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV17	.	.	+INF	0.0228
FR7 .PV18	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV19	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV21	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV22	.	.	+INF	0.0242
FR7 .PV23	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV24	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV26	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV27	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV28	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV2	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV3	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV4	.	.	+INF	0.0374

FR8 .PV5	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV6	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PV7	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV8	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV9	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV10	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV11	.	.	+INF	0.0250
FR8 .PV12	.	.	+INF	0.0236
FR8 .PV13	.	.	+INF	0.0540
FR8 .PV14	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV15	.	.	+INF	0.0817
FR8 .PV16	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV17	.	.	+INF	.
FR8 .PV18	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV19	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV21	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV22	.	.	+INF	0.0094
FR8 .PV23	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV24	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV26	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV27	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV28	.	.	+INF	0.0227
FR9 .PV1	.	.	+INF	0.0020
FR9 .PV2	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PV3	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV4	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV5	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV6	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PV7	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV8	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV9	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV10	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PV11	.	.	+INF	0.0562
FR9 .PV12	.	.	+INF	0.0400
FR9 .PV13	.	.	+INF	0.0557
FR9 .PV14	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV15	.	.	+INF	0.1425
FR9 .PV16	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV17	.	.	+INF	0.0245
FR9 .PV18	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV19	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV20	.	.	+INF	0.0003
FR9 .PV21	.	.	+INF	0.0029
FR9 .PV22	.	.	+INF	0.0111
FR9 .PV23	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PV24	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV25	.	.	+INF	0.0043
FR9 .PV26	.	.	+INF	0.0085
FR9 .PV27	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV28	.	.	+INF	0.0391
FR10.PV1	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV2	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV3	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV4	.	.	+INF	0.0380

FR10.PV5	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV6	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV7	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV8	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV9	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV10	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV11	.	.	+INF	0.0403
FR10.PV12	.	.	+INF	0.0241
FR10.PV13	.	.	+INF	0.0546
FR10.PV14	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV15	.	.	+INF	0.0971
FR10.PV16	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV17	.	.	+INF	0.0045
FR10.PV18	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV19	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV20	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV21	.	.	+INF	0.0074
FR10.PV22	.	.	+INF	.
FR10.PV23	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV24	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV25	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV26	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV27	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV28	.	.	+INF	0.0232
FR11.PV1	.	.	+INF	0.0056
FR11.PV2	.	.	+INF	0.0828
FR11.PV3	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV4	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV5	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV6	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV7	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV8	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV9	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV10	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV11	.	.	+INF	0.0704
FR11.PV12	.	.	+INF	0.0542
FR11.PV13	.	.	+INF	0.0699
FR11.PV14	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV15	.	.	+INF	0.1419
FR11.PV16	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV17	.	.	+INF	0.0239
FR11.PV18	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV19	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV20	.	.	+INF	0.0090
FR11.PV21	.	.	+INF	0.0066
FR11.PV22	.	.	+INF	0.0253
FR11.PV23	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV24	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV25	.	.	+INF	0.0080
FR11.PV26	.	.	+INF	0.0238
FR11.PV27	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV28	.	.	+INF	0.0533
FR12.PV1	.	.	+INF	0.0082
FR12.PV2	.	.	+INF	0.0673
FR12.PV3	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV4	.	.	+INF	0.0525

FR12.PV5	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV6	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV7	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV8	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV9	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV10	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV11	.	.	+INF	0.0548
FR12.PV12	.	.	+INF	0.0386
FR12.PV13	.	.	+INF	0.0543
FR12.PV14	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV15	.	.	+INF	0.0968
FR12.PV16	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV17	.	.	+INF	0.0083
FR12.PV18	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV19	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV20	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV21	.	.	+INF	0.0078
FR12.PV22	.	.	+INF	0.0046
FR12.PV23	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV24	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV25	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV26	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV27	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV28	.	.	+INF	0.0377

—— VAR F4 flujo de FR a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	27.3900	+INF	.
FR2 .CA0	.	27.5700	+INF	.
FR3 .CA0	.	22.2600	+INF	.
FR4 .CA0	.	22.0900	+INF	.
FR5 .CA0	.	.	+INF	0.0005
FR6 .CA0	.	22.9100	+INF	.
FR7 .CA0	.	.	+INF	0.0005
FR8 .CA0	.	5.1617	+INF	.
FR9 .CA0	.	.	+INF	0.0016
FR10.CA0	.	.	+INF	0.0008
FR11.CA0	.	.	+INF	0.0014
FR12.CA0	.	.	+INF	0.0013

—— VAR F5 flujo de FR a ET

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	+INF	0.0006
FR2 .ET0	.	.	+INF	0.0023
FR3 .ET0	.	.	+INF	0.0003
FR4 .ET0	.	.	+INF	0.0014
FR5 .ET0	.	23.0000	+INF	.
FR6 .ET0	.	.	+INF	0.0006
FR7 .ET0	.	17.0800	+INF	.
FR8 .ET0	.	11.8083	+INF	.
FR9 .ET0	.	10.5800	+INF	.
FR10.ET0	.	10.7500	+INF	.

FR11.ET0	.	14.7500	+INF	.
FR12.ET0	.	14.6800	+INF	.
—— VAR F6 flujo de PLA a CA				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	+INF	0.0029
—— VAR F7 flujo de PLN a CA				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	+INF	0.0013
PL3 .CA0	.	.	+INF	0.0021
PL4 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL5 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PL6 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL7 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL8 .CA0	.	.	+INF	0.0035
PL9 .CA0	.	.	+INF	0.0031
PL10.CA0	.	.	+INF	0.0029
PL11.CA0	.	.	+INF	0.0024
PL12.CA0	.	.	+INF	.
PL13.CA0	.	.	+INF	0.0026
—— VAR F8 flujo de CA a ET				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	12.7382	+INF	.
—— VAR F9 flujo de ET a RS				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	115.3865	+INF	.
—— VAR F10 flujo de CA a P1				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT01	.	114.6435	+INF	.
—— VAR F11 flujo de CA a P2				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT02	.	.	+INF	0.0156
—— VAR F12 flujo de CA a P3				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT03	.	.	+INF	.

—— VAR F13 flujo de PV a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	+INF	0.0034
PV2 .CA0	.	.	+INF	0.0021
PV3 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV4 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV5 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV6 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV7 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV8 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV9 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV10.CA0	.	.	+INF	0.0021
PV11.CA0	.	.	+INF	1.5334599E-5
PV12.CA0	.	.	+INF	0.0017
PV13.CA0	.	.	+INF	0.0005
PV14.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV15.CA0	.	.	+INF	0.0021
PV16.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV17.CA0	.	.	+INF	0.0027
PV18.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV19.CA0	.	.	+INF	0.0026
PV20.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV21.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV22.CA0	.	.	+INF	0.0016
PV23.CA0	.	.	+INF	0.0029
PV24.CA0	.	.	+INF	0.0026
PV25.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV26.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV27.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV28.CA0	.	.	+INF	0.0024

—— VAR A

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2	.	.	1.0000	1.4921
PL3	.	.	1.0000	1.4921
PL4	.	.	1.0000	1.4921
PL5	.	.	1.0000	1.4921
PL6	.	.	1.0000	1.4921
PL7	.	.	1.0000	1.4921
PL8	.	.	1.0000	1.4921
PL9	.	.	1.0000	1.4921
PL10	.	.	1.0000	1.4921
PL11	.	.	1.0000	1.4921
PL12	.	.	1.0000	1.4921
PL13	.	.	1.0000	1.4921

—— VAR B

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT02	.	.	1.0000	12768.3954

—— VAR C				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT03	.	.	1.0000	-9.191301E+6
—— VAR E1				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR2 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR3 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR4 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR6 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR8 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR12 .CA0	.	.	1.0000	EPS
—— VAR E2				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR2 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR3 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR4 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR5 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR6 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR7 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR8 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR10 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR11 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR12 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
—— VAR E3				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1 .CA0	.	.	1.0000	EPS
—— VAR E4				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL7 .CA0	.	.	1.0000	EPS

PL8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL12 .CA0	.	.	1.0000	-713532.5330
PL13 .CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E5

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E6

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E7

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV12 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV13 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV14 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV15 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV16 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV17 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV18 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV19 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV20 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV21 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV22 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV23 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV24 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV25 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV26 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV27 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV28 .CA0	.	.	1.0000	EPS

	LOWER	LEVEL	UPPER
MARGINAL			
—— VAR C01	-INF	1442330.9072	+INF



```

—— VAR C02          -INF          751552.0131          +INF          .
—— VAR C03          -INF          2346918.4566          +INF          .
—— VAR C04          -INF          2407514.0759          +INF          .
—— VAR C05          -INF          .          +INF          .
—— VAR F01          -INF          6948315.4528          +INF          .
—— VAR F02          -INF          5971511.6037          +INF          .
—— VAR gamma        -INF          0.8925          +INF          .

**** REPORT SUMMARY :           0      NONOPT
                                0      INFEASIBLE
                                0      UNBOUNDED
                                12     PROJECTED

EXECUTION TIME      =           0.000 SECONDS      2 MB  28.1.0  r5b48834 WEX-WEI

```

## Resultados principales

Para este problema se seleccionó el óptimo alcanzado al otorgar 50% de importancia tanto a la función objetivo de costos como a la de puntaje ambiental. A continuación se presentarán los valores de los flujos obtenidos para la configuración de este primer problema. Notar que si las casillas están vacías, significa que el flujo es igual a 0 toneladas mensuales.

Tabla D.18: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 3, en toneladas por mes.

PL ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PL1												
PL2												
PL3												
PL4												
PL5												
PL6												
PL7												
PL8												
PL9												
PL10												
PL11												
PL12												
PL13												
PL14												

Tabla D.19: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 3, en toneladas por mes.

PV←FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PV1												
PV2												
PV3												
PV4												
PV5												
PV6												
PV7												
PV8												
PV9												
PV10												
PV11												
PV12												
PV13												
PV14												
PV15												
PV16												
PV17												
PV18												
PV19												
PV20												
PV21												
PV22												
PV23												
PV24												
PV25												
PV26												
PV27												
PV28												

Tabla D.20: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 3.

Destino ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
CA0	27,39	27,57	22,26	22,09		22,91		5,16				
ET0					23,00		17,08	11,81	10,58	10,75	14,75	14,68

Tabla D.21: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 3.

CA → PT	PT01	PT02	PT03
CA0	114,64		

Tabla D.22: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 3.

CA → ET	ET0
CA0	12,74

Tabla D.23: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 3.

<b>ET → RS</b>	<b>RS0</b>
<b>ET0</b>	115,39

## D.2.4. Problema 4

### Documento entregado por GAMS

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 07:02:45 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation
```

```
COMPILE TIME = 0.016 SECONDS 3 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 07:02:45 Page 2
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	51	SINGLE EQUATIONS	280
BLOCKS OF VARIABLES	33	SINGLE VARIABLES	653
NON ZERO ELEMENTS	3,505	DISCRETE VARIABLES	82

```
GENERATION TIME = 0.016 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
EXECUTION TIME = 0.016 SECONDS 4 MB 28.1.0 r5b48834 WEX-WEI
```

```
GAMS 28.1.0 r5b48834 Released Aug 2, 2019 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows -
09/11/19 07:02:45 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE MEMORIA Using MIP From line 464
```

#### S O L V E S U M M A R Y

MODEL	MEMORIA	OBJECTIVE	gamma
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	464

```
**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE 0.8925
```

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.031	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	106	2000000000

IBM ILOG CPLEX 28.1.0 r5b48834 Released Aug 02, 2019 WEI x86 64bit/MS Window  
 — GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
 Cplex 12.9.0.0

Space for names approximately 0.02 Mb  
 Use option 'names no' to turn use of names off  
 MIP status(101): integer optimal solution  
 Cplex Time: 0.03sec (det. 9.95 ticks)  
 Fixing integer variables, and solving final LP...  
 Fixed MIP status(1): optimal  
 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.69 ticks)  
 Proven optimal solution.

MIP Solution: 0.892478 (102 iterations, 0 nodes)  
 Final Solve: 0.892478 (4 iterations)  
 Best possible: 0.892478  
 Absolute gap: 0.000000  
 Relative gap: 0.000000

— VAR F1 flujo de FR a PLA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL1	.	.	+INF	0.0508
FR2 .PL1	.	.	+INF	0.0386
FR3 .PL1	.	.	+INF	0.0377
FR4 .PL1	.	.	+INF	0.0232
FR5 .PL1	.	.	+INF	0.0227
FR6 .PL1	.	.	+INF	0.0057
FR7 .PL1	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL1	.	.	+INF	0.0079
FR9 .PL1	.	.	+INF	0.0391
FR10 .PL1	.	.	+INF	0.0232
FR11 .PL1	.	.	+INF	0.0533
FR12 .PL1	.	.	+INF	0.0377

— VAR F2 flujo de FR a PLN

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PL2	.	.	+INF	0.0376
FR1 .PL3	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PL4	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PL5	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL6	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL7	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL8	.	.	+INF	0.0657
FR1 .PL9	.	.	+INF	0.0655
FR1 .PL10	.	.	+INF	0.0360
FR1 .PL11	.	.	+INF	0.0036
FR1 .PL12	.	.	+INF	0.0240
FR1 .PL13	.	.	+INF	0.0212
FR2 .PL2	.	.	+INF	0.0402

FR2 .PL3	.	.	+INF	0.0006
FR2 .PL4	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL5	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PL6	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL7	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PL8	.	.	+INF	0.0832
FR2 .PL9	.	.	+INF	0.0534
FR2 .PL10	.	.	+INF	0.0534
FR2 .PL11	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PL12	.	.	+INF	.
FR2 .PL13	.	.	+INF	0.0239
FR3 .PL2	.	.	+INF	0.0246
FR3 .PL3	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL4	.	.	+INF	0.0377
FR3 .PL5	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL6	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL7	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL8	.	.	+INF	0.0675
FR3 .PL9	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PL10	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PL11	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PL12	.	.	+INF	0.0257
FR3 .PL13	.	.	+INF	0.0082
FR4 .PL2	.	.	+INF	0.0248
FR4 .PL3	.	.	+INF	0.0084
FR4 .PL4	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL5	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL6	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL7	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PL8	.	.	+INF	0.0677
FR4 .PL9	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PL10	.	.	+INF	0.0380
FR4 .PL11	.	.	+INF	0.0084
FR4 .PL12	.	.	+INF	0.0109
FR4 .PL13	.	.	+INF	0.0084
FR5 .PL2	.	.	+INF	0.0095
FR5 .PL3	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PL4	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PL5	.	.	+INF	0.0079
FR5 .PL6	.	.	+INF	0.0050
FR5 .PL7	.	.	+INF	0.0048
FR5 .PL8	.	.	+INF	0.0524
FR5 .PL9	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PL10	.	.	+INF	0.0079
FR5 .PL11	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PL12	.	.	+INF	0.0402
FR5 .PL13	.	.	+INF	0.0060
FR6 .PL2	.	.	+INF	0.0093
FR6 .PL3	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL4	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PL5	.	.	+INF	0.0001
FR6 .PL6	.	.	+INF	0.0062
FR6 .PL7	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL8	.	.	+INF	0.0522
FR6 .PL9	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL10	.	.	+INF	0.0224

FR6 .PL11	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PL12	.	.	+INF	0.0252
FR6 .PL13	.	.	+INF	0.0076
FR7 .PL2	.	.	+INF	0.0095
FR7 .PL3	.	.	+INF	0.0670
FR7 .PL4	.	.	+INF	0.0079
FR7 .PL5	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL6	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL7	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PL8	.	.	+INF	0.0524
FR7 .PL9	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL10	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL11	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PL12	.	.	+INF	0.0698
FR7 .PL13	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL2	.	.	+INF	.
FR8 .PL3	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL4	.	.	+INF	0.0028
FR8 .PL5	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PL6	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PL7	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL8	.	.	+INF	0.0377
FR8 .PL9	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PL10	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL11	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PL12	.	.	+INF	0.0402
FR8 .PL13	.	.	+INF	0.0227
FR9 .PL2	.	.	+INF	0.0259
FR9 .PL3	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PL4	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL5	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL6	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PL7	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL8	.	.	+INF	0.0098
FR9 .PL9	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL10	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PL11	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PL12	.	.	+INF	0.0714
FR9 .PL13	.	.	+INF	0.0391
FR10 .PL2	.	.	+INF	0.0041
FR10 .PL3	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL4	.	.	+INF	0.0069
FR10 .PL5	.	.	+INF	0.0085
FR10 .PL6	.	.	+INF	0.0232
FR10 .PL7	.	.	+INF	0.0232
FR10 .PL8	.	.	+INF	0.0234
FR10 .PL9	.	.	+INF	0.0085
FR10 .PL10	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL11	.	.	+INF	0.0380
FR10 .PL12	.	.	+INF	0.0555
FR10 .PL13	.	.	+INF	0.0232
FR11 .PL2	.	.	+INF	0.0254
FR11 .PL3	.	.	+INF	0.0681
FR11 .PL4	.	.	+INF	0.0385
FR11 .PL5	.	.	+INF	0.0385
FR11 .PL6	.	.	+INF	0.0385

FR11.PL7	.	.	+INF	0.0385
FR11.PL8	.	.	+INF	.
FR11.PL9	.	.	+INF	0.0238
FR11.PL10	.	.	+INF	0.0385
FR11.PL11	.	.	+INF	0.0533
FR11.PL12	.	.	+INF	0.0709
FR11.PL13	.	.	+INF	0.0533
FR12.PL2	.	.	+INF	0.0098
FR12.PL3	.	.	+INF	0.0525
FR12.PL4	.	.	+INF	0.0082
FR12.PL5	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL6	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL7	.	.	+INF	0.0230
FR12.PL8	.	.	+INF	0.0084
FR12.PL9	.	.	+INF	0.0058
FR12.PL10	.	.	+INF	0.0377
FR12.PL11	.	.	+INF	0.0525
FR12.PL12	.	.	+INF	0.0553
FR12.PL13	.	.	+INF	0.0230

—— VAR F3 flujo de FR a PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .PV1	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV2	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV3	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV4	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV5	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PV6	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV7	.	.	+INF	0.0065
FR1 .PV8	.	.	+INF	0.0010
FR1 .PV9	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV10	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV11	.	.	+INF	0.0236
FR1 .PV12	.	.	+INF	0.0221
FR1 .PV13	.	.	+INF	.
FR1 .PV14	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV15	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV16	.	.	+INF	0.0005
FR1 .PV17	.	.	+INF	0.0509
FR1 .PV18	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV19	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV20	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV21	.	.	+INF	0.0655
FR1 .PV22	.	.	+INF	0.0523
FR1 .PV23	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV24	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV25	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV26	.	.	+INF	0.0508
FR1 .PV27	.	.	+INF	0.0212
FR1 .PV28	.	.	+INF	0.0212
FR2 .PV1	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV2	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV3	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV4	.	.	+INF	0.0088

FR2 .PV5	.	.	+INF	0.0062
FR2 .PV6	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV7	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV8	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV9	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV10	.	.	+INF	0.0002
FR2 .PV11	.	.	+INF	0.0114
FR2 .PV12	.	.	+INF	0.0247
FR2 .PV13	.	.	+INF	0.0257
FR2 .PV14	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV15	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV16	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV17	.	.	+INF	0.0388
FR2 .PV18	.	.	+INF	0.0239
FR2 .PV19	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV20	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV21	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV22	.	.	+INF	0.0549
FR2 .PV23	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV24	.	.	+INF	0.0386
FR2 .PV25	.	.	+INF	0.0829
FR2 .PV26	.	.	+INF	0.0682
FR2 .PV27	.	.	+INF	0.0091
FR2 .PV28	.	.	+INF	0.0239
FR3 .PV1	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV2	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV3	.	.	+INF	0.0078
FR3 .PV4	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV5	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV6	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV7	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV8	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV9	.	.	+INF	0.0004
FR3 .PV10	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV11	.	.	+INF	0.0105
FR3 .PV12	.	.	+INF	0.0091
FR3 .PV13	.	.	+INF	0.0248
FR3 .PV14	.	.	+INF	0.0056
FR3 .PV15	.	.	+INF	0.0672
FR3 .PV16	.	.	+INF	0.0229
FR3 .PV17	.	.	+INF	0.0378
FR3 .PV18	.	.	+INF	0.0076
FR3 .PV19	.	.	+INF	0.0082
FR3 .PV20	.	.	+INF	0.0377
FR3 .PV21	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV22	.	.	+INF	0.0392
FR3 .PV23	.	.	+INF	0.0080
FR3 .PV24	.	.	+INF	0.0077
FR3 .PV25	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV26	.	.	+INF	0.0525
FR3 .PV27	.	.	+INF	0.0081
FR3 .PV28	.	.	+INF	0.0065
FR4 .PV1	.	.	+INF	0.0675
FR4 .PV2	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV3	.	.	+INF	0.0043
FR4 .PV4	.	.	+INF	0.0037



FR4 .PV5	.	.	+INF	0.0083
FR4 .PV6	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV7	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV8	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV9	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV10	.	.	+INF	0.0076
FR4 .PV11	.	.	+INF	.
FR4 .PV12	.	.	+INF	0.0241
FR4 .PV13	.	.	+INF	0.0250
FR4 .PV14	.	.	+INF	0.0051
FR4 .PV15	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV16	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV17	.	.	+INF	0.0233
FR4 .PV18	.	.	+INF	0.0046
FR4 .PV19	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV20	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV21	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV22	.	.	+INF	0.0395
FR4 .PV23	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV24	.	.	+INF	0.0232
FR4 .PV25	.	.	+INF	0.0675
FR4 .PV26	.	.	+INF	0.0527
FR4 .PV27	.	.	+INF	0.0046
FR4 .PV28	.	.	+INF	0.0084
FR5 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV2	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV3	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV4	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV5	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV6	.	.	+INF	0.0049
FR5 .PV7	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV8	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV9	.	.	+INF	0.0077
FR5 .PV10	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV11	.	.	+INF	0.0398
FR5 .PV12	.	.	+INF	.
FR5 .PV13	.	.	+INF	0.0393
FR5 .PV14	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV15	.	.	+INF	0.0817
FR5 .PV16	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV17	.	.	+INF	0.0228
FR5 .PV18	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV19	.	.	+INF	0.0016
FR5 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV21	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV22	.	.	+INF	0.0242
FR5 .PV23	.	.	+INF	0.0078
FR5 .PV24	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV26	.	.	+INF	0.0374
FR5 .PV27	.	.	+INF	0.0227
FR5 .PV28	.	.	+INF	0.0079
FR6 .PV1	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV2	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV3	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV4	.	.	+INF	0.0224

FR6 .PV5	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV6	.	.	+INF	0.0028
FR6 .PV7	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV8	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV9	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV10	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV11	.	.	+INF	0.0100
FR6 .PV12	.	.	+INF	0.0085
FR6 .PV13	.	.	+INF	0.0390
FR6 .PV14	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV15	.	.	+INF	0.0667
FR6 .PV16	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV17	.	.	+INF	0.0078
FR6 .PV18	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV19	.	.	+INF	0.0049
FR6 .PV20	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV21	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV22	.	.	+INF	0.0239
FR6 .PV23	.	.	+INF	0.0224
FR6 .PV24	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV25	.	.	+INF	0.0519
FR6 .PV26	.	.	+INF	0.0372
FR6 .PV27	.	.	+INF	0.0076
FR6 .PV28	.	.	+INF	0.0076
FR7 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV2	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV3	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV4	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV5	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV6	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV7	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV8	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV9	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV10	.	.	+INF	0.0670
FR7 .PV11	.	.	+INF	0.0546
FR7 .PV12	.	.	+INF	0.0236
FR7 .PV13	.	.	+INF	0.0540
FR7 .PV14	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV15	.	.	+INF	0.1113
FR7 .PV16	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV17	.	.	+INF	0.0228
FR7 .PV18	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV19	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV21	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV22	.	.	+INF	0.0242
FR7 .PV23	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV24	.	.	+INF	0.0522
FR7 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV26	.	.	+INF	0.0227
FR7 .PV27	.	.	+INF	0.0374
FR7 .PV28	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV1	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV2	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV3	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV4	.	.	+INF	0.0374

FR8 .PV5	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV6	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PV7	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV8	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV9	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV10	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV11	.	.	+INF	0.0250
FR8 .PV12	.	.	+INF	0.0236
FR8 .PV13	.	.	+INF	0.0540
FR8 .PV14	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV15	.	.	+INF	0.0817
FR8 .PV16	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV17	.	.	+INF	.
FR8 .PV18	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV19	.	.	+INF	0.0079
FR8 .PV20	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV21	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV22	.	.	+INF	0.0094
FR8 .PV23	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV24	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV25	.	.	+INF	0.0374
FR8 .PV26	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV27	.	.	+INF	0.0227
FR8 .PV28	.	.	+INF	0.0227
FR9 .PV1	.	.	+INF	0.0020
FR9 .PV2	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PV3	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV4	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV5	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV6	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PV7	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV8	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV9	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV10	.	.	+INF	0.0686
FR9 .PV11	.	.	+INF	0.0562
FR9 .PV12	.	.	+INF	0.0400
FR9 .PV13	.	.	+INF	0.0557
FR9 .PV14	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV15	.	.	+INF	0.1425
FR9 .PV16	.	.	+INF	0.0539
FR9 .PV17	.	.	+INF	0.0245
FR9 .PV18	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV19	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV20	.	.	+INF	0.0003
FR9 .PV21	.	.	+INF	0.0029
FR9 .PV22	.	.	+INF	0.0111
FR9 .PV23	.	.	+INF	0.0243
FR9 .PV24	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV25	.	.	+INF	0.0043
FR9 .PV26	.	.	+INF	0.0085
FR9 .PV27	.	.	+INF	0.0391
FR9 .PV28	.	.	+INF	0.0391
FR10.PV1	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV2	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV3	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV4	.	.	+INF	0.0380

FR10.PV5	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV6	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV7	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV8	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV9	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV10	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV11	.	.	+INF	0.0403
FR10.PV12	.	.	+INF	0.0241
FR10.PV13	.	.	+INF	0.0546
FR10.PV14	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV15	.	.	+INF	0.0971
FR10.PV16	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV17	.	.	+INF	0.0045
FR10.PV18	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV19	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV20	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV21	.	.	+INF	0.0074
FR10.PV22	.	.	+INF	.
FR10.PV23	.	.	+INF	0.0380
FR10.PV24	.	.	+INF	0.0528
FR10.PV25	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV26	.	.	+INF	0.0085
FR10.PV27	.	.	+INF	0.0232
FR10.PV28	.	.	+INF	0.0232
FR11.PV1	.	.	+INF	0.0056
FR11.PV2	.	.	+INF	0.0828
FR11.PV3	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV4	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV5	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV6	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV7	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV8	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV9	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV10	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV11	.	.	+INF	0.0704
FR11.PV12	.	.	+INF	0.0542
FR11.PV13	.	.	+INF	0.0699
FR11.PV14	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV15	.	.	+INF	0.1419
FR11.PV16	.	.	+INF	0.0681
FR11.PV17	.	.	+INF	0.0239
FR11.PV18	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV19	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV20	.	.	+INF	0.0090
FR11.PV21	.	.	+INF	0.0066
FR11.PV22	.	.	+INF	0.0253
FR11.PV23	.	.	+INF	0.0385
FR11.PV24	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV25	.	.	+INF	0.0080
FR11.PV26	.	.	+INF	0.0238
FR11.PV27	.	.	+INF	0.0533
FR11.PV28	.	.	+INF	0.0533
FR12.PV1	.	.	+INF	0.0082
FR12.PV2	.	.	+INF	0.0673
FR12.PV3	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV4	.	.	+INF	0.0525

FR12.PV5	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV6	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV7	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV8	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV9	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV10	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV11	.	.	+INF	0.0548
FR12.PV12	.	.	+INF	0.0386
FR12.PV13	.	.	+INF	0.0543
FR12.PV14	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV15	.	.	+INF	0.0968
FR12.PV16	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV17	.	.	+INF	0.0083
FR12.PV18	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV19	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV20	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV21	.	.	+INF	0.0078
FR12.PV22	.	.	+INF	0.0046
FR12.PV23	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV24	.	.	+INF	0.0525
FR12.PV25	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV26	.	.	+INF	0.0230
FR12.PV27	.	.	+INF	0.0377
FR12.PV28	.	.	+INF	0.0377

—— VAR F4 flujo de FR a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	27.3900	+INF	.
FR2 .CA0	.	27.5700	+INF	.
FR3 .CA0	.	22.2600	+INF	.
FR4 .CA0	.	22.0900	+INF	.
FR5 .CA0	.	.	+INF	0.0005
FR6 .CA0	.	22.9100	+INF	.
FR7 .CA0	.	.	+INF	0.0005
FR8 .CA0	.	5.1617	+INF	.
FR9 .CA0	.	.	+INF	0.0016
FR10.CA0	.	.	+INF	0.0008
FR11.CA0	.	.	+INF	0.0014
FR12.CA0	.	.	+INF	0.0013

—— VAR F5 flujo de FR a ET

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	+INF	0.0006
FR2 .ET0	.	.	+INF	0.0023
FR3 .ET0	.	.	+INF	0.0003
FR4 .ET0	.	.	+INF	0.0014
FR5 .ET0	.	23.0000	+INF	.
FR6 .ET0	.	.	+INF	0.0006
FR7 .ET0	.	17.0800	+INF	.
FR8 .ET0	.	11.8083	+INF	.
FR9 .ET0	.	10.5800	+INF	.
FR10.ET0	.	10.7500	+INF	.

FR11.ET0	.	14.7500	+INF	.
FR12.ET0	.	14.6800	+INF	.
—— VAR F6 flujo de PLA a CA				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	+INF	0.0029
—— VAR F7 flujo de PLN a CA				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	+INF	0.0013
PL3 .CA0	.	.	+INF	0.0021
PL4 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL5 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PL6 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL7 .CA0	.	.	+INF	0.0029
PL8 .CA0	.	.	+INF	0.0035
PL9 .CA0	.	.	+INF	0.0031
PL10.CA0	.	.	+INF	0.0029
PL11.CA0	.	.	+INF	0.0024
PL12.CA0	.	.	+INF	.
PL13.CA0	.	.	+INF	0.0026
—— VAR F8 flujo de CA a ET				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	12.7382	+INF	.
—— VAR F9 flujo de ET a RS				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	115.3865	+INF	.
—— VAR F10 flujo de CA a P1				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT01	.	114.6435	+INF	.
—— VAR F11 flujo de CA a P2				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT02	.	.	+INF	0.0147
—— VAR F12 flujo de CA a P3				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.PT03	.	.	+INF	.

—— VAR F13 flujo de PV a CA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	+INF	0.0034
PV2 .CA0	.	.	+INF	0.0021
PV3 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV4 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV5 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV6 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV7 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV8 .CA0	.	.	+INF	0.0024
PV9 .CA0	.	.	+INF	0.0026
PV10.CA0	.	.	+INF	0.0021
PV11.CA0	.	.	+INF	1.5334599E-5
PV12.CA0	.	.	+INF	0.0017
PV13.CA0	.	.	+INF	0.0005
PV14.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV15.CA0	.	.	+INF	0.0021
PV16.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV17.CA0	.	.	+INF	0.0027
PV18.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV19.CA0	.	.	+INF	0.0026
PV20.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV21.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV22.CA0	.	.	+INF	0.0016
PV23.CA0	.	.	+INF	0.0029
PV24.CA0	.	.	+INF	0.0026
PV25.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV26.CA0	.	.	+INF	0.0034
PV27.CA0	.	.	+INF	0.0024
PV28.CA0	.	.	+INF	0.0024

—— VAR A

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2	.	.	1.0000	1.4921
PL3	.	.	1.0000	1.4921
PL4	.	.	1.0000	1.4921
PL5	.	.	1.0000	1.4921
PL6	.	.	1.0000	1.4921
PL7	.	.	1.0000	1.4921
PL8	.	.	1.0000	1.4921
PL9	.	.	1.0000	1.4921
PL10	.	.	1.0000	1.4921
PL11	.	.	1.0000	1.4921
PL12	.	.	1.0000	1.4921
PL13	.	.	1.0000	1.4921

—— VAR B

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT02	.	.	1.0000	12768.3954

—— VAR C

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PT03	.	.	1.0000	-1.089125E+7

—— VAR E1

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR2 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR3 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR4 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR6 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR8 .CA0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
FR10.CA0	.	.	1.0000	EPS
FR11.CA0	.	.	1.0000	EPS
FR12.CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E2

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
FR1 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR2 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR3 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR4 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR5 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR6 .ET0	.	.	1.0000	EPS
FR7 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR8 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR9 .ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR10.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR11.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
FR12.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS

—— VAR E3

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL1.CA0	.	.	1.0000	EPS

—— VAR E4

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PL2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL7 .CA0	.	.	1.0000	EPS



PL8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PL12 .CA0	.	.	1.0000	-713532.5330
PL13 .CA0	.	.	1.0000	EPS
—— VAR E5				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
CA0.ET0	.	1.0000	1.0000	EPS
—— VAR E6				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
ET0.RS0	.	1.0000	1.0000	EPS
—— VAR E7				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
PV1 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV2 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV3 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV4 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV5 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV6 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV7 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV8 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV9 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV10 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV11 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV12 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV13 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV14 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV15 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV16 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV17 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV18 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV19 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV20 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV21 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV22 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV23 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV24 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV25 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV26 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV27 .CA0	.	.	1.0000	EPS
PV28 .CA0	.	.	1.0000	EPS
		LOWER	LEVEL	UPPER
MARGINAL				
—— VAR C01				
		-INF	1442330.9072	+INF

```

—— VAR C02          -INF          751552.0131          +INF          .
—— VAR C03          -INF          2346918.4566          +INF          .
—— VAR C04          -INF          2407514.0759          +INF          .
—— VAR C05          -INF          .                    +INF          .
—— VAR F01          -INF          6948315.4528          +INF          .
—— VAR F02          -INF          5394472.5157          +INF          .
—— VAR gamma        -INF          0.8925              +INF          .

**** REPORT SUMMARY :          0      NONOPT
                                0      INFEASIBLE
                                0      UNBOUNDED
                                12     PROJECTED

EXECUTION TIME      =          0.016 SECONDS      2 MB  28.1.0  r5b48834 WEX-WEI

```

## Resultados principales

Para este problema se seleccionó el óptimo alcanzado al otorgar 50% de importancia tanto a la función objetivo de costos como a la de puntaje ambiental. A continuación se presentarán los valores de los flujos obtenidos para la configuración de este primer problema. Notar que si las casillas están vacías, significa que el flujo es igual a 0 toneladas mensuales.

Tabla D.24: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos limpios para el problema 4, en toneladas por mes.

PL ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PL1												
PL2												
PL3												
PL4												
PL5												
PL6												
PL7												
PL8												
PL9												
PL10												
PL11												
PL12												
PL13												
PL14												

Tabla D.25: Resultado: valores de los flujos entre las franjas y los puntos verdes para el problema 4, en toneladas por mes.

PV←FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
PV1												
PV2												
PV3												
PV4												
PV5												
PV6												
PV7												
PV8												
PV9												
PV10												
PV11												
PV12												
PV13												
PV14												
PV15												
PV16												
PV17												
PV18												
PV19												
PV20												
PV21												
PV22												
PV23												
PV24												
PV25												
PV26												
PV27												
PV28												

Tabla D.26: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre las franjas y otros destinos como el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 4.

Destino ← FR	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	FR9	FR10	FR11	FR12
CA0	27,39	27,57	22,26	22,09		22,91		5,16				
ET0					23,00		17,08	11,08	10,58	10,75	14,75	14,68

Tabla D.27: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y las plantas de tratamiento, para el problema 4.

CA → PT	PT01	PT02	PT03
CA0	114,64		

Tabla D.28: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre el centro de acopio y la estación de transferencia, para el problema 4.

CA → ET	ET0
CA0	12,74

Tabla D.29: Resultado: valores de los flujos en toneladas por mes, entre la estación de transferencia y el relleno sanitario, para el problema 4.

<b>ET → RS</b>	<b>RS0</b>
<b>ET0</b>	115,39