



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTORADO EN INGENIERÍA

Análisis de eficiencia y elaboración de propuestas de mejora de la GIRSU  
en municipios del SO de la Pcia. Buenos Aires y de Cataluña  
a través de modelos integrados por DEA y RNA

**Antonella Cavallin**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2019

## PREFACIO

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctora en Ingeniería, de la Universidad Nacional del Sur, y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otras. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Departamento de Ingeniería, durante el período comprendido entre el 26 de agosto de 2014 y el 5 de abril de 2019, bajo la dirección de los Doctores Hernán Vigier y Mariano Frutos.

Antonella Cavallin

antonella.cavallin@uns.edu.ar

Departamento de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Bahía Blanca, 28 mayo de 2019.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ...../...../....., mereciendo la calificación de .....(.....)



*Permiso para equivocarme,  
en este eterno comienzo...*



# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
AGRADECIMIENTOS .....	17
RESUMEN .....	19
ABSTRACT .....	19
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. Aspectos generales.....	23
1.1.1. Motivación.....	24
1.1.2. Objetivos .....	25
1.2. Conceptos básicos de residuos.....	25
1.2.1. Residuos sólidos urbanos .....	27
1.2.2. Caracterización de los RSU.....	28
1.2.3. Composición de los RSU .....	28
1.3. Gestión de RSU .....	33
1.3.1. Breve historia .....	33
1.3.2. La problemática de los RSU .....	34
1.3.3. El comienzo de una solución .....	35
1.4. Gestión integral de residuos sólidos urbanos .....	37
1.5. GIRSU en la Unión Europea y Latinoamérica .....	38
1.5.1. Unión europea.....	38
1.5.2. España.....	45
1.5.3. América latina y el caribe .....	52
1.5.4. Argentina.....	55
CAPÍTULO II	
CONCEPTUALIZACIÓN DE UN MODELO EFICIENTE DE GIRSU .....	63

2.1. Decisiones en pos de una GIRSU eficiente .....	65
2.1.1. Gestión Estratégica de RSU.....	66
2.1.2. Gestión Táctica de RSU .....	67
2.1.3. Gestión Operativa de RSU.....	67
2.1.4. Guía de preguntas para las distintas gestiones .....	67
2.2. Gestión táctica de RSU.....	67
2.2.1. Recolección y transporte .....	68
2.2.2. Frecuencia de recolección.....	72
2.2.3. Disponibilidad de personal .....	73
2.2.4. Motivación de la población .....	73
2.3. Indicadores para la GIRSU.....	75
2.3.1. Relevamiento de Indicadores GIRSU .....	77

### CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	87
3.1. Revisión de metodologías y herramientas en la GIRSU .....	89
3.1.1. Herramienta para medir eficiencia .....	92
3.1.2. Herramientas de predicción.....	93
3.1.3. Integración de herramientas .....	94
3.2. Indicadores.....	95
3.2.1. Construcción de indicadores compuestos .....	96
3.2.3. Tipos de indicadores compuestos.....	98
3.2.4. Indicador de productividad y eficiencia.....	99
3.3. DEA .....	100
3.3.1. Características y metodología .....	101
3.3.2. Desarrollo de los modelos matemáticos DEA .....	103
3.3.3. Modelo CCR- <i>Input</i> .....	104
3.3.4. Modelo CCR- <i>Output</i> .....	106

3.3.5. Modelo BCC- <i>Input</i> .....	107
3.3.6. Modelo BCC- <i>Output</i> .....	108
3.3.7. Rendimientos de escala con DEA .....	108
3.3.8. Modelos DEA IRS y DEA DRS.....	109
3.3.9. Tratamiento de las holguras .....	112
3.3.10. Modelos con inputs acotados.....	113
3.4. Regresión Lineal .....	113
3.4.1. Características y metodología .....	113
3.4.2. Supuestos del modelo de regresión lineal .....	114
3.4.3. Método de selección de variables .....	116
3.4.4. Bondad de ajuste.....	116
3.5. Redes Neuronales.....	117
3.5.1. Características y metodologías.....	117
3.5.2. Modelización de una RNA.....	120
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>GIRSU EN REGIONES ESPECÍFICAS.....</b>	<b>121</b>
4.1. GIRSU en el Sudoeste de la Provincia de Bs. As .....	123
4.1.1. Relevamiento de datos e información.....	125
4.2. GIRSU en Cataluña.....	128
4.2.1. Relevamiento de datos e información.....	131
4.3. Comparación de respuestas.....	138
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>139</b>
<b>ANÁLISIS DE EFICIENCIA EN LA GTRSU.....</b>	<b>139</b>
5.1. Modelos DEA y resultados de eficiencia en SOBA .....	141
5.1.1. Elección y definición de subindicadores.....	141
5.1.2. Datos, modelos y resultados.....	143
5.1.3. Análisis de los resultados de eficiencia .....	145

5.1.4. Análisis de holguras .....	148
5.1.5. Análisis de sensibilidad.....	148
5.1.6. Análisis de <i>Benchmark</i> .....	151
5.1.7. Influencia de la densidad poblacional en la eficiencia .....	154
5.2. Modelos DEA y resultados de eficiencia en Cataluña .....	156
5.2.1. Elección y definición de subindicadores.....	156
5.2.2. Análisis de los resultados de eficiencia .....	162
5.2.3. Análisis de resultados de los rendimientos de escala .....	164
5.2.4. Análisis de sensibilidad.....	165
5.2.5. Análisis de Holguras .....	167
5.2.6. Análisis de Benchmark.....	168
5.2.7. Influencia de la densidad poblacional en la eficiencia .....	172
5.3. Limitaciones de los modelos planteados .....	173
 <b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RECURSOS PARA LA AYUDA EN LA TOMA DE DECISIONES EN LA GTRSU .....</b>	
<b>175</b>	
6.1. Predicción en Municipios de Gestión Básica (MGB) .....	177
6.1.1. Descripción general .....	177
6.1.2. Resultados .....	185
6.1.3. Análisis de la variación resultante de los recursos .....	187
6.2. Método para migrar de MGB a MGA .....	187
6.2.1. Descripción general .....	187
6.2.2. Resultados .....	193
6.2.3. Análisis de la variación resultante de los recursos .....	195
6.3. Limitaciones de los modelos planteados .....	196
 <b>CAPÍTULO VII</b>	
<b>CONCLUSIONES .....</b>	
<b>199</b>	
7.1. Descripción de los sistemas de GRSU .....	201

7.2. Análisis de eficiencia de la GTRSU .....	204
7.3. Métodos de predicción de GTRSU eficientes .....	205
7.4. Trabajos futuros .....	206
7.5. Reflexiones finales .....	206
BIBLIOGRAFÍA .....	209
ANEXOS.....	220
ANEXO 1. Análisis de sensibilidad en SOBA.....	220
ANEXO 2. Porcentajes de proyección y holguras por localidad según cada análisis realizado en SOBA .....	229
ANEXO 3. Porcentajes de proyección y holguras según cada input y output en SOBA .....	232
ANEXO 4. Análisis de sensibilidad en Cataluña .....	234
ANEXO 5. Porcentajes de proyección y holguras por localidad en Cataluña .....	250



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de los RSU .....	29
Tabla 2. Composición física de los RSU de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2009. .....	30
Tabla 3. Generación de RSU por habitante (kg/año) en la UE y en sus países miembros. .....	41
Tabla 4. Cantidades enviadas a Relleno Sanitario, Incineración, Reciclaje, Compostaje y Otras formas. Unión Europea 1995-2016 .....	43
Tabla 5. Asociaciones de los SIGs con mayor implantación en España.....	49
Tabla 6. Cantidad de vidrio recuperada por el SIG <i>Ecovidrio</i> en España, 2013 a 2017. 50	
Tabla 7. Componentes en peso de los RSU en Argentina. Fuente: elaboración de la DNGIR. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación en base a datos provistos por el Censo 2010.....	59
Tabla 8. Decisiones requeridas en cada uno de los niveles de la GIRSU .....	68
Tabla 9. Clasificación de indicadores por grado de avance de la gestión. Elaboración propia .....	77
Tabla 10. Indicadores recolectados ligados a la generación de RSU, según clasificación.79	
Tabla 11. Indicadores recolectados ligados a la recolección de RSU, según clasificación. .....	80
Tabla 12. Indicadores recolectados ligados a la disposición final de RSU, según clasificación. ....	80
Tabla 13. Indicadores recolectados ligados a la opinión social y concientización, según clasificación. ....	81
Tabla 14. Indicadores de eficiencia recolectados, según clasificación.....	81
Tabla 15. Referencias bibliográficas de los indicadores recolectados según clasificación.81	
Tabla 16. Tipos de indicadores compuestos.....	98
Tabla 17. Nomenclatura utilizada en los modelos DEA .....	103
Tabla 18. Resumen de métodos de disposición final de RSU en SOBA.....	127
Tabla 19. Resumen de métodos de determinación de rutas de recolección y frecuencias en SOBA.....	127
Tabla 20. Resumen de Metodología para la ubicación de contenedores en Cataluña... 135	
Tabla 21. Resumen de metodologías de determinación de las rutas de recolección de RSU en Cataluña. ....	135

Tabla 22. Resumen de metodologías de determinación de la frecuencia de recolección de RSU en Cataluña. ....	135
Tabla 23. Resumen de respuestas de metodologías de percepción social en Cataluña-	136
Tabla 24. Resumen de respuestas sobre punto débiles de la GIRSU en Cataluña. ....	138
Tabla 25. Comparación de respuestas principales entre SOBA y Cataluña.....	138
Tabla 26. Subindicadores seleccionados para los análisis DEA en el SOBA.....	141
Tabla 27. Valores máximos, mínimos, media y desvío de los subindicadores, a partir de los datos relevados en el SOBA.....	143
Tabla 28. Datos del SOBA utilizados en los análisis DEA .....	144
Tabla 29. Modelos y resumen de resultados de los análisis DEA en el SOBA. ....	144
Tabla 30. Eficiencias obtenidas para cada localidad en cada análisis DEA realizado en SOBA.....	145
Tabla 31. Resumen del análisis <i>Benchmark</i> en SOBA.....	151
Tabla 32. <i>Benchmark</i> según modelos CCR SOBA.....	152
Tabla 33. <i>Benchmark</i> según modelos BCC SOBA.....	152
Tabla 34. <i>Benchmark</i> . Conteo de referencias de las localidades ineficientes en SOBA .	153
Tabla 35. <i>Benchmark</i> . Suma de intensidades en las relaciones de referencias en SOBA. ....	154
Tabla 36. Análisis de correlación entre eficiencia y densidad poblacional en SOBA....	154
Tabla 37. Subindicadores seleccionados para los análisis DEA en el SOBA.....	156
Tabla 38. Conteo de veces que se realiza recolección en un mismo sitio.....	157
Tabla 39. Valores máximos, mínimos, media y desvío de los subindicadores, a partir de los datos relevados en Cataluña .....	158
Tabla 40. Modelos y resumen de resultados de los análisis DEA en Cataluña .....	158
Tabla 41. Eficiencias obtenidas para cada localidad en cada análisis DEA realizado en Cataluña.....	160
Tabla 42. Resumen <i>benchmark</i> en Cataluña .....	169
Tabla 43. Frecuencias de DMU de referencias en modelos CCR en Cataluña. ....	170
Tabla 44. Frecuencias de DMU de referencias en modelos BCC en Cataluña .....	170
Tabla 45. Principales <i>benchmark</i> para localidades ineficientes en Cataluña.....	171
Tabla 46. Análisis de correlación entre eficiencia y densidad poblacional en Cataluña.	172
Tabla 47. Coeficientes de bondad de ajuste de la regresión lineal obtenida para M1-RL .....	179

Tabla 48. Datos utilizados y predicciones de RL y RNA en la etapa 2 de la heurística M1 .....	186
Tabla 49. Eficiencias de la etapa 2 y proyecciones obtenidas de la etapa 3 de M1. ....	186
Tabla 50. Variación porcentual resultante de los recursos. ....	187
Tabla 51. Coeficientes de bondad de ajuste de la regresión lineal obtenida para M2-RL .....	189
Tabla 52. Datos utilizados y predicciones de la etapa 2 de la heurística M2 .....	194
Tabla 53. Eficiencias de la etapa 2 y proyecciones de la etapa 3 de la heurística M2 ....	195
Tabla 54. Variaciones porcentuales de los recursos. ....	196
Tabla 55. Análisis de sensibilidad A1-CCR-SOBA .....	220
Tabla 56. Análisis de sensibilidad A1-BCC-SOBA .....	221
Tabla 57. Análisis de sensibilidad A2-CCR-SOBA .....	222
Tabla 58. Análisis de sensibilidad A2-BCC-SOBA .....	223
Tabla 59. Análisis de sensibilidad A3-CCR-SOBA .....	224
Tabla 60. Análisis de sensibilidad A3-BCC-SOBA .....	225
Tabla 61. Análisis de sensibilidad A4-CCR-SOBA .....	226
Tabla 62. Análisis de sensibilidad A4-BCC-SOBA .....	227
Tabla 63. Análisis de sensibilidad A5-CCR-SOBA .....	228
Tabla 64. Análisis de sensibilidad A5-BCC-SOBA .....	228
Tabla 65. Holguras en análisis A1-CCR-SOBA.....	229
Tabla 66. Holguras en análisis A1-BCC-SOBA.....	229
Tabla 67. Holguras en análisis A2-CCR-SOBA.....	230
Tabla 68. Holguras en análisis A3-CCR-SOBA.....	230
Tabla 69. Holguras en análisis A2-BCC-SOBA.....	230
Tabla 70. Holguras en análisis A3-BCC-SOBA.....	230
Tabla 71. Holguras en análisis A4-CCR-SOBA.....	231
Tabla 72. Holguras en análisis A4-BCC-SOBA.....	231
Tabla 73. Holguras en análisis A5-CCR-SOBA.....	231
Tabla 74. Holguras en análisis A5-BCC-SOBA.....	231
Tabla 75. Holguras obtenidas para la capacidad de los camiones de recolección de RSU en SOBA.....	232
Tabla 76. Holguras obtenidas en cada análisis para la frecuencia de recolección de RSU en SOBA.....	232

Tabla 77. Holguras obtenidas en cada análisis para la disponibilidad de personal de recolección de RSU en SOBA.....	233
Tabla 78. Holguras obtenidas en cada análisis para la cantidad de RSU y RSUR recolectados en SOBA. ....	233
Tabla 79. Análisis de sensibilidad A1-CCR-Cataluña .....	234
Tabla 80. Análisis de sensibilidad A1-BCC-Cataluña.....	235
Tabla 81. Análisis de sensibilidad A2-CCR-Cataluña .....	236
Tabla 82. Análisis de sensibilidad A2-BCC-Cataluña.....	237
Tabla 83. Análisis de sensibilidad A3-CCR-Cataluña .....	238
Tabla 84. Análisis de sensibilidad A3-BCC-Cataluña.....	239
Tabla 85 Análisis de sensibilidad A4-CCR-Cataluña .....	240
Tabla 86. Análisis de sensibilidad A4-BCC-Cataluña.....	241
Tabla 87. Análisis de sensibilidad A5-CCR-Cataluña.....	242
Tabla 88. Análisis de sensibilidad A5-BCC-Cataluña.....	243
Tabla 89. Análisis de sensibilidad A6-CCR-Cataluña.....	244
Tabla 90. Análisis de sensibilidad A6-BCC-Cataluña.....	245
Tabla 91. Análisis de sensibilidad A7-CCR-Cataluña.....	246
Tabla 92, Análisis de sensibilidad A7-BCC-Cataluña.....	247
Tabla 93. Análisis de sensibilidad A8-CCR-Cataluña.....	248
Tabla 94. Análisis de sensibilidad A8-BCC-Cataluña.....	249
Tabla 95. Holguras obtenidas en análisis A1- CCR-Cataluña.....	250
Tabla 96. Holguras obtenidas en análisis A1- BCC-Cataluña. ....	250
Tabla 97. Holguras obtenidas en análisis A2- CCR-Cataluña.....	250
Tabla 98. Holguras obtenidas en análisis A3- CCR-Cataluña.....	250
Tabla 99. Holguras obtenidas en análisis A2- BCC-Cataluña. ....	251
Tabla 100. Holguras obtenidas en análisis A3- BCC-Cataluña. ....	251
Tabla 101. Holguras obtenidas en análisis A4- CCR-Cataluña. ....	251
Tabla 102. Holguras obtenidas en análisis A4- BCC-Cataluña. ....	251
Tabla 103. Holguras obtenidas en análisis A5- BCC-Cataluña. ....	252
Tabla 104. Holguras obtenidas en análisis A5- BCC-Cataluña. ....	252
Tabla 105. Holguras obtenidas en análisis A6- CCR-Cataluña. ....	252
Tabla 106. Holguras obtenidas en análisis A7- CCR-Cataluña. ....	252
Tabla 107. Holguras obtenidas en análisis A6- BCC-Cataluña. ....	253
Tabla 108. Holguras obtenidas en análisis A7- BCC-Cataluña. ....	253

Tabla 109. Holguras obtenidas en análisis A8- CCR-Cataluña. ....	253
Tabla 110. Holguras obtenidas en análisis A8- BCC-Cataluña .....	253
Tabla 111. Holguras obtenidas en cada análisis para la capacidad de los camiones de recolección de RSU en Cataluña. ....	254
Tabla 112. Holguras obtenidas en cada análisis para las horas del personal de recolección en Cataluña .....	254
Tabla 113. Holguras obtenidas en cada análisis para la frecuencia de recolección de RSU y RSUR según cada caso, en Cataluña.....	255
Tabla 114. Holguras obtenidas en cada análisis para la capacidad de contenedores de RSU y RSUR según cada caso, en Cataluña.....	255
Tabla 115. Holguras obtenidas en cada análisis para la cantidad de RSU recolectados, en Cataluña.....	256
Tabla 116. Holguras obtenidas para los diferentes outputs de cada análisis, en Cataluña .....	256



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición física de los RSU según el nivel de ingreso de los países. Porcentajes en peso. ....	31
Figura 2. Composición física de los RSU según las regiones del mundo.....	31
Figura 3. Generación de RSU per cápita según el PBI per cápita por países (US \$/año).32	
Figura 4. Cantidad de tipos de residuos generados desde 1960 a 2014, en miles de toneladas.....	32
Figura 5. Depósito de basura ilegal y sin control de la ciudad de Bahía Blanca.....	35
Figura 6. Generación de RSU 2016-2006 por países de la UE .....	42
Figura 7. Porcentaje de RSU reciclado en algunos países de la UE.....	44
Figura 8. España y sus Comunidades Autónomas .....	46
Figura 9. Destino de los RSU en España, en kg per cápita anuales, 2007-2016.....	47
Figura 10. Tasa de RSU reciclados y compostados en España del 2007 al 2016. ....	47
Figura 11. RSU recolectados mezclados vs RSU recolectados recuperados en España en el año 2015. ....	52
Figura 12. Generación de RSU per cápita en los países de América Latina y el Caribe. Año 2014.....	53
Figura 13. Porcentaje de recuperación de RSU en América Latina y el Caribe. Año 2014. ....	54
Figura 14. Cantidad de RSU por tipo de disposición final de residuos según el rango poblacional en Argentina.....	61
Figura 15. Niveles y alcances de la GIRSU: Gestión estratégica, táctica y operativa .....	66
Figura 16. Contenedores diferenciados de RSU localizados en los denominados “Puntos Limpios” de la ciudad de Bahía Blanca.....	72
Figura 17. Herramientas y métodos dentro de la investigación operativa utilizadas en la GIRSU .....	90
Figura 18. Herramientas y métodos dentro de las TICs utilizadas en la GIRSU .....	90
Figura 19. Porcentajes de publicaciones según cada aplicación que utilizan herramientas de la IO .....	91
Figura 20. Porcentajes de publicaciones según cada aplicación que utilizan herramientas de las TICs.....	91
Figura 21. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes.....	103
Figura 22. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes considerando holguras. ....	103
Figura 23. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes de escala en DEA.....	110

Figura 24. Gráfico de fronteras de eficiencia CCR, BCC y DRS. ....	110
Figura 25. Gráfico de fronteras de eficiencia CCR, BCC y IRS. ....	111
Figura 26. Composición y metodología de funcionamiento general de una RNA. ....	118
Figura 27. Izquierda: Secciones electorales de la Provincia de Buenos Aires. Derecha: partidos de la sexta sección correspondiente a la región del Sudoeste. ....	124
Figura 28. Mapa político de las provincias, comarcas y municipios de Cataluña. ....	129
Figura 29. Origen y destino de los RSU en Cataluña. ....	132
Figura 30. Relación con los recolectores informales en Cataluña. ....	137
Figura 31. Resumen de respuestas de la autoevaluación de la GIRSU en Cataluña. ....	138
Figura 32. Conjunto de gráficos de red de las variaciones de eficiencia CCR y BCC según cada análisis. ....	147
Figura 33. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A1-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis. ....	149
Figura 34. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A2-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis. ....	149
Figura 35. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A4-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis. ....	150
Figura 36. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A1-BCC al retirar la localidad de Stroeder del análisis. ....	150
Figura 37. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias <i>benchmark</i> en los modelos CCR de SOBA. ....	152
Figura 38. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias <i>benchmark</i> en los modelos BCC de SOBA. ....	153
Figura 39. Valores de eficiencia según DEA y según método Tobit, considerando la densidad poblacional como variable explicativa en el análisis A1-BCC. ....	155
Figura 40. Conjunto de gráficos de red de las variaciones de eficiencia CCR, BCC e IRS según cada análisis en Cataluña. ....	162
Figura 41. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 5-CCR al retirar la localidad de Terrassa del análisis. ....	165
Figura 42. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 5-BCC al retirar la localidad de Terrassa del análisis. ....	166
Figura 43. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 7-CCR al retirar la localidad de Girona del análisis. ....	166

Figura 44. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 6-CCR al retirar la localidad de Girona del análisis.....	167
Figura 45. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias <i>benchmark</i> en los modelos CCR en Cataluña. ....	170
Figura 46. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias <i>benchmark</i> en los modelos BCC en Cataluña. ....	171
Figura 47. Heurística para estimar la cantidad recursos necesarios para una GTRSU eficiente en el SOBA,.....	179
Figura 48. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación H-C.....	180
Figura 49. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación O-M.....	181
Figura 50. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación H-M.....	181
Figura 51. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación LnO-LnF.....	182
Figura 52. Configuración de la RNA en M1-RNA.....	183
Figura 53. Características y desempeño de la RNA utilizada en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab. ....	184
Figura 54. Desempeño del error medio cuadrático de la predicción realizada por la RNA en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab. ....	184
Figura 55. Correlación entre los datos originales y los predecidos por la RNA en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab.....	184
Figura 56. Heurística para predecir movimientos de recursos de los municipios del SOBA para migrar a un sistema de recolección por contenedores. ....	189
Figura 57. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación LnH-LnC.....	190
Figura 58. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación LnOc-LnM.....	190
Figura 59. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación LnS-LnH - LnN.....	190
Figura 60. Configuración RNA en etapa 2 de M2. ....	191
Figura 61. Características y desempeño de la RNA utilizada en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab. ....	192
Figura 62. Desempeño del error medio cuadrático de la predicción realizada por la RNA en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab. ....	193
Figura 63. Correlación entre los datos originales y los predecidos por la RNA en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab.....	193



## AGRADECIMIENTOS

Este documento, que académicamente significa el cierre de mis estudios doctorales, personalmente representa un hito de balance, de mirar hacia atrás y reflexionar sobre todos los momentos vividos en estos 5 años.

En primer lugar, quiero resaltar que este espacio de formación y aprendizaje no hubieran sido posible llevar a cabo sin el financiamiento de CONICET y la Universidad Nacional del Sur, a los cuales les agradezco haberme dado esta oportunidad tan importante.

En segundo lugar, agradezco a mis directores, Hernán y Mariano, por haber sabido y podido guiarme sin forzarme y sugerirme sin obligarme. Creo que hicimos un muy buen equipo durante estos años, y estoy muy agradecida por ello.

Muchas gracias también a todos los profesores y profesoras que me supieron transmitir muy bien sus saberes y experiencias y que me ayudaron a aprender sobre las distintas técnicas, herramientas y softwares necesarios para poder desarrollar la tesis. Por nombrar sólo algunxs, gracias a Valentina, Juan y Ariel.

Por otro lado, quiero agradecer especialmente a:

- Diego, Daniel y Diego Broz, quienes fueron y son unos compañeros excepcionales. Sin dudar, mi paso por el mundo científico no hubiera sido lo mismo sin ellos, con nuestras charlas, risas y mates; y con sus consejos y constante interés en ayudarme, cuando la cosa avanzaba.
- Mamá y papá, esto es un logro compartido entre lxs tres. Con idas y vueltas, al final siempre nos encontramos y de una mejor manera. Gracias por eso.
- Luchi y Fran, *hermanitos* míos, no está demás el momento para agradecerles por estar siempre y acompañarme encada decisión.
- Manu, la persona con la que comparto todos mis días, gracias por acompañarme en las buenas y en las no tan buenas, por aguantarme, festejarme y cuestionarme si era necesario.
- *Además, muito obrigada aos meus colegas da UFSM, Fernanda, Erica, Ana e Tiago, de Santa Maria, Brasil; i moltes gràcies al meu company Tony, de la URiV, Catalunya, España.*

Por último, gracias a la vida y todas aquellas personas que se preocuparon por mí y dieron su granito de arena para poder desarrollar y disfrutar esta etapa de mi vida.



## **RESUMEN**

En el presente estudio doctoral se aborda el tema de la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) con el objetivo de describir los sistemas y analizar la eficiencia en la gestión táctica de los mismos. Para ello, se seleccionaron dos regiones de interés, el Sudodeste de la Provincia de Buenos Aires (SOBA) y Cataluña, a partir de los cuales se recolectaron los datos necesarios de 18 y 19 municipios respectivamente, para evaluar la eficiencia relativa de los mismos mediante el análisis DEA. Se realizaron diferentes modelos DEA, con rendimientos constantes y variables, para obtener distintos resultados, así como las recomendaciones necesarias para llevar los municipios hacia la eficiencia. Los resultados indican a Bahía Blanca como la única localidad del SOBA que registra la máxima eficiencia en todos los análisis, y a Terrasa en la región de Cataluña. Posteriormente, se utilizan los resultados obtenidos en DEA para entrenar Redes Neuronales Artificiales y formular modelos de Regresión Lineal, que ayuden en la toma de decisiones de largo plazo, respecto a la proyección de aumento de generación de RSU así como la planificación inicial de recursos para que los municipios del SOBA migren a un sistema de GIRSU que valore los RSU, como el instalado en Cataluña. Los resultados muestran que sólo las localidades de Bahía Blanca, Carmen de Patagones, Laprida, Monte Hermoso y Villalonga, necesitarían ampliar su capacidad actual de camiones para migrar a un sistema por contenedores (además de adaptarlos con la tecnología necesaria), mientras que, en cuestión de disponibilidad de personal, todas las localidades muestran estar sobradas y preparadas para migrar a dicho sistema.

## **ABSTRACT**

In the present thesis, the tactical management of Municipal Solid Waste Management (MSW) is addressed with the aim of describing the system and analyzing its efficiency. For this, two regions of interest were selected, the Southeast of the Province of Buenos Aires of Argentina (SOBA) and Catalonia, Spain. For this purpose, data from 18 and 19 municipalities respectively for each region was collected to evaluate the relative efficiency through the DEA analysis. Different DEA models were applied with constant and variable yields to obtain different efficiency results as well as the recommendations to enhance the efficiency of the municipalities. The results indicate that Bahia Blanca is the only SOBA locality that registers maximum efficiency in all the performed analyses.

Similarly, Terrasa is the efficient locality in the region of Catalonia. Later, the results obtained in DEA were used to train Artificial Neural Networks and to formulate models of Linear Regression that support the decision-making process in the long run, considering the expected increment in the MSW generation waste. In order to migrate to a system that recovers the resources from waste, as it is performed in Catalonia), the municipalities from the SOBA Bahía Blanca, Carmen de Patagones, Laprida, Monte Hermoso, and Villalonga need to expand the current capacity of trucks to migrate to a system by containers (in addition to adapting them with the necessary technology). However, in regard to the availability of personnel, the localities do not require to make any adjustment.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN



## 1.1. Aspectos generales

La presente tesis fue desarrollada en el marco de las actividades para obtener el título de Doctora en Ingeniería en la Universidad Nacional del Sur, estudios comenzados en junio de 2014 y finalizados en abril de 2019. El tema central de investigación fue la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), analizando las distintas estrategias utilizadas en diferentes partes del mundo para alcanzar gestiones eficientes y comprometidas con el medio ambiente y la sociedad, y estudiando y experimentando alguna de las metodologías y herramientas utilizadas para la ayuda en la toma de decisiones.

El presente trabajo comienza, en el Capítulo I, con una introducción a la temática de GIRSU, los diferentes conceptos utilizados, la historia y descripción de la problemática ambiental de los RSU, la evolución histórica y las estrategias actuales en torno a la GIRSU en América Latina y el Caribe, luego focalizado en Argentina, y en Europa, y luego enfocado en España, países en los que se centra el presente estudio. Asimismo, se detallan los marcos legales desarrollados a través de los años. Este capítulo pretende lograr un estudio descriptivo y cualitativo que sirva de soporte a los posteriores análisis cuantitativos. Posteriormente, el Capítulo II pretende conceptualizar las actividades y modelos eficientes de GIRSU a través de la diferenciación entre gestión estratégica, táctica y operativa. Asimismo, se realiza una importante revisión bibliográfica focalizada en el desarrollo de indicadores en torno a la GIRSU, y se realiza una clasificación de los mismos según el alcance esperado y la posibilidad de medición dentro de la gestión de un municipio. Posteriormente, en el Capítulo III, se desarrolla el marco teórico que da sustento a las herramientas y metodologías utilizadas en el trabajo: *Data Envelopment Analysis (DEA)*, Regresión Lineal y Redes Neuronales Artificiales (RNA). Asimismo, se realiza una revisión bibliográfica que muestra los principales trabajos desarrollados en el país y en el mundo y que sientan las bases para el comienzo del presente estudio doctoral. En el Capítulo IV, se explican y describen las gestiones tácticas de RSU en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (SOBA) y en la región de Cataluña. Además, para cada uno se detallan los resultados de las encuestas utilizadas para recolectar datos e información en los distintos municipios, los cuales fueron utilizados en los siguientes capítulos. El Capítulo V, se divide en dos investigaciones, una en el SOBA y otro en Cataluña. En cada una se explican los modelos de DEA utilizados para evaluar la eficiencia relativa dentro de cada región y luego se muestran los resultados respectivos, de

la mano de análisis de sensibilidad, holguras y *benchmark*. A continuación, en el Capítulo VI se utilizan algunos de los resultados del capítulo anterior, así como los conocimientos y aprendizajes adquiridos en el estudio cualitativo de los Capítulos I y II, para diseñar modelos de predicción de recursos necesarios para una GIRSU eficiente. Se proponen 2 heurísticas, una para proyectar aumentos de recursos para atender crecimientos de generación de RSU dentro de los municipios del SOBA; y la otra, para que, estos últimos, puedan proyectar migrar del sistema de recolección de RSU actual (puerta a puerta) a un sistema por contenedores (como el utilizado en Cataluña) el cual considera la segregación y valorización de los RSU. Los modelos de predicción utilizados son Regresión Lineal y RNA. Estos son usados en cada una de las heurísticas, de manera que posteriormente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos. Por último, en el Capítulo VII se enuncian las principales conclusiones y reflexiones del trabajo.

### **1.1.1. Motivación**

La motivación principal que presenta este estudio doctoral se basa en conocer en profundidad las distintas GIRSU llevadas a cabo en los diferentes contextos mundiales, para poder determinar un marco ambiental que ayude a la toma de decisiones económicas y políticas. Dado que las ciudades basan su crecimiento en un modelo de producción y consumo, que sigue un camino contrario a la sostenibilidad ambiental, económica y social (González González & Lázaro Torres, 2005), se pretende que el presente trabajo contribuya a evitar la continuidad de los problemas complejos que han alcanzado las grandes metrópolis actuales debido a las ineficientes o inexistentes GIRSU. Una adecuada GIRSU debe abordar, en su planificación, los problemas de estructura, sociales, medioambientales y asumir el principio de precaución por su incidencia en la salud de sus habitantes, identificando amenazas que puedan impedir la buena calidad de vida de los ciudadanos, así como potenciales fortalezas que puedan hacer emerger regiones olvidadas del país. La perspectiva ambiental debe necesariamente analizar el comportamiento sistémico de la ciudad, sobre la base de sus flujos tanto de personas como de insumos, productos y residuos. Estos desafíos ambientales en las ciudades nacen de la necesidad de potenciar los recursos existentes y re direccionar la expansión urbana minimizando su costo ecológico (Naredo, 2007). Es sabido que en la gran mayoría de las ciudades argentinas la GIRSU son deficientes; además de que no valorizan los RSU, desperdiciando recursos, energía y promoviendo una cultura poco comprometida con el ambiente en el que vive. Es también una gran motivación del presente trabajo, desarrollar

un estudio y herramienta que contribuya a los conocimientos nacionales en torno a la GIRSU y que sirva de ayuda en la toma de decisión de aquellos municipios que quieran evolucionar hacia una gestión que minimice la basura y maximice la valorización de residuos.

### **1.1.2. Objetivos**

El objetivo general de esta investigación es analizar los distintos modos de gestión de los RSU en pos de desarrollar herramientas que ayuden a los gestores en la toma de decisiones eficientes y sustentables para la sociedad y el medioambiente

Del objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar los distintos enfoques de GIRSU en el mundo,
2. Determinar, describir y analizar los distintos indicadores que hacen eficiente a una gestión urbana con miras al desarrollo sustentable,
3. Seleccionar un sistema de indicadores que sea sustancial para evaluar y monitorear en forma integrada la gestión de los RSU, y además sirva como instrumento para la toma de decisiones y fijación de políticas públicas,
4. Cuantificar los indicadores seleccionados en un conjunto de localidades seleccionadas,
5. Evaluar los indicadores estimados en el marco de criterios de eficiencia en la gestión urbana sustentable para identificar aquellos que presenten debilidades y proponer mejoras en los factores que las originan, y
6. Establecer una importante línea de investigación, ausente actualmente en nuestro país.

## **1.2. Conceptos básicos de residuos**

Es sabido que los sistemas naturales no generan productos residuales de forma acumulable, es decir, el ciclo natural de la materia es cerrado ya que se hacen y deshacen toda una serie de estructuras sin generar ningún tipo de residuo que no sea asimilable por la propia naturaleza. Es la intervención humana la que rompe este ciclo natural de la materia y produce residuos acumulables al querer obtener más bienes para, supuestamente, progresar y mejorar su calidad de vida. Se entiende por residuo a todo material que es destinado al abandono por su productor o poseedor, pudiendo resultar de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza.

Los residuos pueden clasificarse en sólidos, líquidos y gaseosos, de acuerdo a su estado físico. Agregándose los residuos pastosos, que comúnmente aparecen como producto de las actividades humanas. El presente trabajo se enfocará en los residuos sólidos, los cuales se caracterizan por mantener ciertas características estructurales desde su origen hasta su disposición final. Los diferentes usos de los materiales, su biodegradabilidad, combustibilidad, reciclabilidad, etc., resultan en una gran variedad y clasificación de los mismos. Algunas de dichas clasificaciones son:

- Por su naturaleza física: secos o húmedos.
- Por su composición química:
  - Orgánicos: aquellos residuos que en algún momento tuvieron vida, formaron parte de un ser vivo o derivan de los procesos de transformación de combustibles fósiles. Son los residuos que provienen de la producción o utilización de materiales naturales sin transformación estructural significativa. Por ello y por su grado de humedad mantienen un índice alto de biodegradabilidad: residuos forestales y de jardín, residuos animales, residuos de comida, heces de animales, residuos agropecuarios y agroindustriales, entre otros.
  - Inorgánicos o sintéticos: son residuos no biodegradables altamente combustibles, provenientes de procesos de síntesis petroquímica como plásticos, fibras sintéticas, entre otros.
- Por riesgos potenciales al medio ambiente:
  - Peligrosos: según la ley 24.051 de la República Argentina, será considerado peligroso todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general. En particular los especificados en el Anexo I o que posean alguna de las características enumeradas en el Anexo II de dicha ley. En general se caracterizan principalmente por poseer una o más de las siguientes propiedades: inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad y patogénico.
  - Inertes: residuos no biodegradables ni combustibles que provienen generalmente de la extracción, procesamiento o utilización de los recursos minerales: vidrio, metales, residuos de construcción y demolición de edificios, tierras, escombros, entre otros.
- Por su fuente generadora:

- Residuos Sólidos Urbanos.
- Residuos de Construcción.
- Residuos Agropecuarios.
- Residuos Clínicos o Sanitarios.
- Residuos Sólidos de Depuradoras de Agua.
- Residuos de Incineración.
- Residuos Industriales.
- Residuos Portuarios, Aeroportuarios y/o Ferroviarios.
- Entre otros.
- Por su destino final:
  - Reciclables.
  - No reciclables.

### 1.2.1. Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU), mal conocidos como “basura”, se producen en los núcleos de población y constituyen un problema para el hombre desde el momento en que su generación alcanza importantes volúmenes y, como consecuencia, empiezan a invadir su espacio vital o de esparcimiento. La Ley 13.592 de la Provincia de Buenos Aires, define a los RSU como aquellos elementos, objetos o sustancias generados y desechados, producto de actividades realizadas en los núcleos urbanos y rurales, comprendiendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucional, asistencial e industrial no especial, asimilable a los residuos domiciliarios. Por su parte, la Ley 25.916 (2004) de la Nación Argentina, describe una definición similar utilizando el concepto de Residuo Domiciliario, como aquellos elementos, objetos o sustancias que, como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados, sean éstos de origen residencial, urbano, comercial, asistencial, sanitario, industrial o institucional, con excepción de aquellos que se encuentren regulados por normas específicas. La ley Catalana 6/1993 DOGC 1776, utiliza la definición de residuos municipales o domésticos a todos los residuos generados en los domicilios particulares, los comercios, las oficinas y los servicios, y también los que no tienen la consideración de residuos especiales y que por su naturaleza o composición se pueden asimilar a los que se producen en los lugares o actividades indicadas. Cabe destacar la gran similitud entre las tres definiciones, por lo que, a los efectos de la presente tesis, y para unificar, se utilizará el término RSU. Según la procedencia y la naturaleza de estos residuos se pueden clasificar en:

Residuos domésticos: residuos sólidos procedentes de la actividad diaria de las residencias (urbanas y rurales) como los residuos de la cocina, restos de comida, papeles, vidrios, material de embalaje, residuos sanitarios, pilas y demás bienes de consumo,

adecuados por su tamaño para ser recogidos por los servicios municipales normales. Se incluyen los residuos de domicilios colectivos, tales como instituciones, escuelas, asilos, etc.

Residuos voluminosos: residuos de origen doméstico, tales como grandes embalajes, muebles, escombros, restos de construcciones etc., y que debido a sus dimensiones no son adecuados para su recolección por los servicios municipales normales, pero que pueden ser eliminados junto con los RSU.

Residuos comerciales y de servicios: residuos generados en las distintas actividades comerciales (locales, mercados, almacenes, restaurantes centros comerciales, bares, etc.) y del sector de servicios (bancos, oficinas, centros de enseñanza, etc.). Por lo general tienen grandes cantidades de papel, plástico, embalajes diversos y residuos sanitarios.

Residuos Industriales: residuos de pequeños talleres y comercios industriales, pero compatibles con las características y cantidades domiciliarias. Por ejemplo, metales, gomas, papeles, vidrios, plásticos, entre otros.

Residuos de limpieza de vías y áreas públicas: procedentes de la actividad de limpieza de calles, paseos y de arreglo de parques y jardines (césped, hojas, troncos, ramas, etc.)

### **1.2.2. Caracterización de los RSU**

Las características de los RSU determinan la clasificación de los residuos y consecuentemente, su manipulación y operación. Algunas de las características importantes a tener en cuenta son:

- Densidad aparente: masa por unidad de volumen.
- Porcentaje por unidad de masa.
- Composición cualitativa: lista de los materiales o sustancias presentes en los RSU.
- Composición cuantitativa: corresponde a la cantidad porcentual de los materiales o cantidad en masa de las sustancias de interés.
- Caracterización química: se someten los RSU a pruebas químicas para determinar el contenido de elementos químicos como carbono, azufre, nitrógeno, potasio y fósforo, así como para especificar el tipo y generación de lixiviados, solubilidad y combustión.

### **1.2.3. Composición de los RSU**

Los RSU están compuestos principalmente por residuos orgánicos, papel, plásticos, metales y vidrios, ver Tabla 1 (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina, 2014). Dado al alto porcentaje de materia orgánica, los RSU

acumulados poseen una gran capacidad de atraer roedores y su descomposición provoca malos olores y un líquido oscuro y altamente contaminante conocido como lixiviado.

Tabla 1. Composición de los RSU

Tipo	Fuentes
Orgánico	Restos de comida, residuos de poda (hojas, pasto, tierra). Servilletas de papel
Papel	Restos de papel, cartón, diarios, revistas, cajas, bolsas de papel, envases de papel, guía de teléfonos, papel de regalo. Si el papel está contaminado con restos de comida, por ejemplo servilletas de papel, se lo considera orgánico.
Plástico	Botellas, envases, bolsas, tapas, vasos.
Vidrio	Botellas, cristalería rota, frascos.
Metal	Latas, papel de aluminio, frascos, tapas, carcasas de electrodomésticos, bicicletas.
Otros reciclables/ reutilizables	Telas, cuero, gomas, tetrapacks, electrodomésticos, hardwares, telgopor.
Otros no reciclables	Pañales, toallas femeninas, residuos sanitarios, medicamentos, cenizas.

Debido a que la naturaleza de los RSU es enormemente variada, la composición de los mismos en cada localidad está sujeta a muchos factores. Algunos de estos son:

- Lugar de procedencia: como puede observarse en la Tabla 2 (CEAMSE, 2009) las zonas céntricas producen más papel y plásticos, mientras que las zonas residenciales tienen, en comparación, mayor producción de residuos ferrosos, desechos de poda y de materiales de la construcción.
- Variación climática: en verano se suelen consumir más verduras y frutas y en invierno se suelen producir más cenizas.
- Variaciones estacionales: en vacaciones, se producen menos RSU en fábricas y comercios, y la composición resulta más variable en los residuos domésticos. Por otra parte, la salida de vacaciones de los ciudadanos tiene como resultado una disminución considerable de los residuos en las ciudades no turísticas y un aumento considerable en las turísticas. Lo mismo puede suceder los fines de semana.
- Calidad de vida: la población con mejor nivel de ingresos suele producir más residuos mientras que las zonas más pobres, no solo se consumen menos bienes sino que también se desperdicia o descarta mucho menos (Tabla 2) (González, 2010). Es decir, se aprovechan los bienes al máximo, reciclando y vendiendo los materiales valorizados como papel, cartón, vidrio y metales. De todas estas variaciones, la más importante en la composición de los residuos es el aumento

del nivel de vida, siendo también el factor más influyente a largo plazo para la gestión de los RSU (Baud, et al., 2001). La composición de los residuos puede ir evolucionando en una ciudad de forma considerable en función del cambio de vida de sus habitantes. En los gráficos de la Figura 1 (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012) se muestra la composición de los RSU en función del ingreso medio del país. Al respecto, es posible observar la gran diferencia en la generación de residuos orgánicos y de papel entre países de bajos ingresos contra los de altos ingresos: en los primeros la principal generación es de residuos orgánicos (68%) y un bajo contenido de papel (5%), mientras que en los segundos la mayoría corresponde a papel (31%) registrando a penas 28% de orgánico. Dicha información puede contrastarse con los datos del gráfico de la Figura 3, el cual muestra la generación de RSU per cápita vs PBI per cápita, por país, quedando evidenciado que los países de mayores ingresos producen mayor cantidad de RSU, como Canada, EEUU y Suiza. Asimismo, en los gráficos de la Figura 2 pueden observarse las diferencias de la composición de los RSU por regiones del mundo.

Tabla 2. Composición física de los RSU de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2009.  
Adaptado de: CEAMSE (2009).

COMPONENTE	Total	Usos del Suelo				Nivel Socio Económico		
		Central	Residen- cial	Residencial Comercial	Mixto	Alto y Medio Alto	Medio	Medio Bajo y Bajo
		%	%	%	%	%	%	%
Papeles y cartones	18,43	22,07	18,06	17,36	18,83	19,89	16,94	19,89
Plásticos	19,70	22,06	19,65	19,03	18,83	22,17	18,57	19,05
Vidrios	3,47	2,93	3,57	3,78	2,80	3,80	3,48	3,04
Metales ferrosos	1,25	0,89	1,27	1,38	1,31	1,19	1,34	1,13
Metales no ferrosos	0,31	0,32	0,26	0,57	0,23	0,36	0,30	0,28
Materiales textiles	3,40	0,55	3,57	4,05	4,28	2,08	4,12	3,48
Madera	0,46	0,21	0,25	1,05	1,24	0,24	0,35	0,99
Goma, cuero y corcho	0,72	0,59	0,58	1,15	1,17	0,57	0,60	1,20
Pañales descartables y apósitos	4,27	2,36	4,88	3,89	2,63	4,74	4,49	3,15
Materiales de construcción y demolición	2,02	0,74	2,17	1,60	3,08	0,46	2,61	2,68
Residuos de poda y jardín	3,65	2,26	3,56	3,80	5,61	2,53	4,18	3,87
Residuos peligrosos	0,20	0,00	0,28	0,11	0,05	0,06	0,33	0,11
Residuos patógenos	0,37	0,58	0,47	0,00	0,00	0,04	0,60	0,27
Medicamentos	0,10	0,53	0,07	0,00	0,01	0,09	0,04	0,25
Desechos alimenticios	40,10	42,30	39,77	40,67	39,02	39,98	40,53	39,31
Misceláneos menores a	1,16	1,19	1,19	1,13	0,91	1,35	1,17	0,89
Aerosoles	0,36	0,41	0,35	0,40	0,25	0,44	0,33	0,33
Pilas	0,03	0,04	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Material electrónico	0,02	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,06

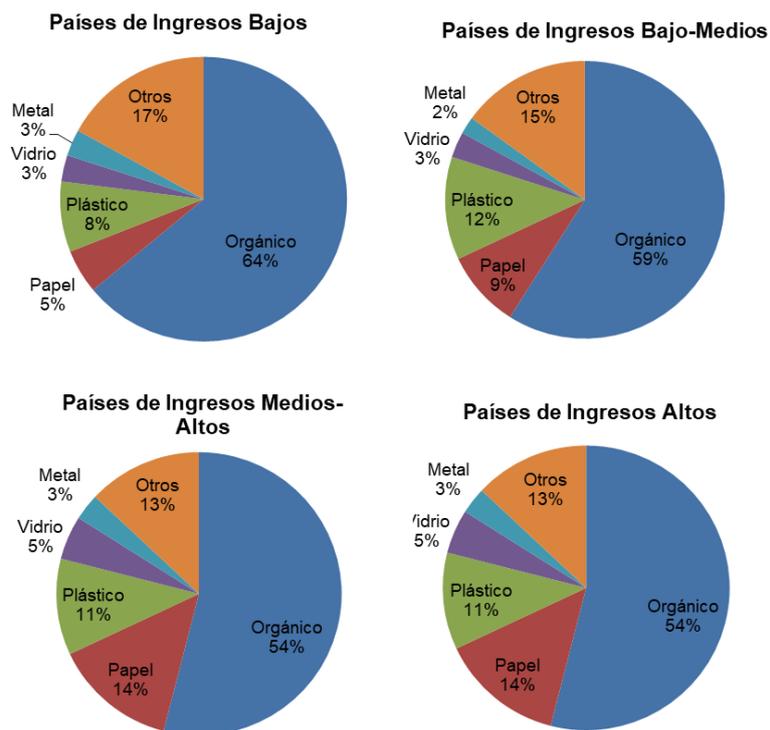


Figura 1. Composición física de los RSU según el nivel de ingreso de los países. Porcentajes en peso. Adaptado de Hoornweg & Bhada-Tata (2012).

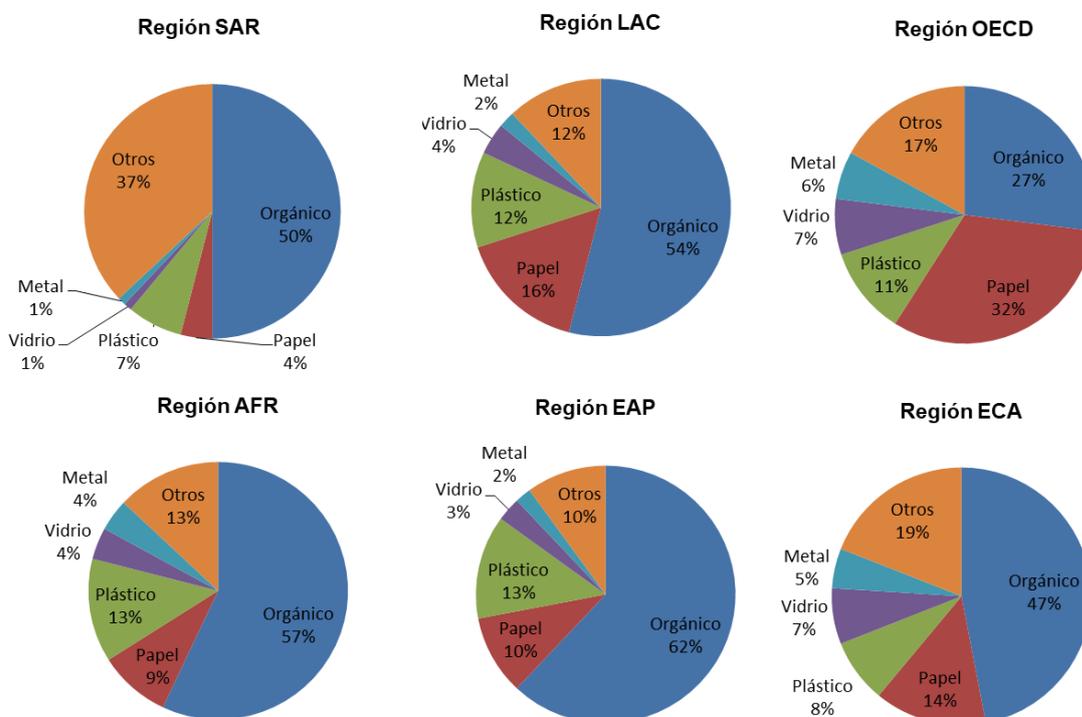


Figura 2. Composición física de los RSU según las regiones del mundo. SAR: Sur de Asia; LAC: América Latina y el Caribe; OECD: Organización para la cooperación económica y el desarrollo; AFR: África; EAP: Asia del Este y la región del Pacífico; ECA: Europa y Asia Central. Adaptado de Hoornweg & Bhada-Tata (2012).

Waste Generation Per Capita vs GDP per Capita

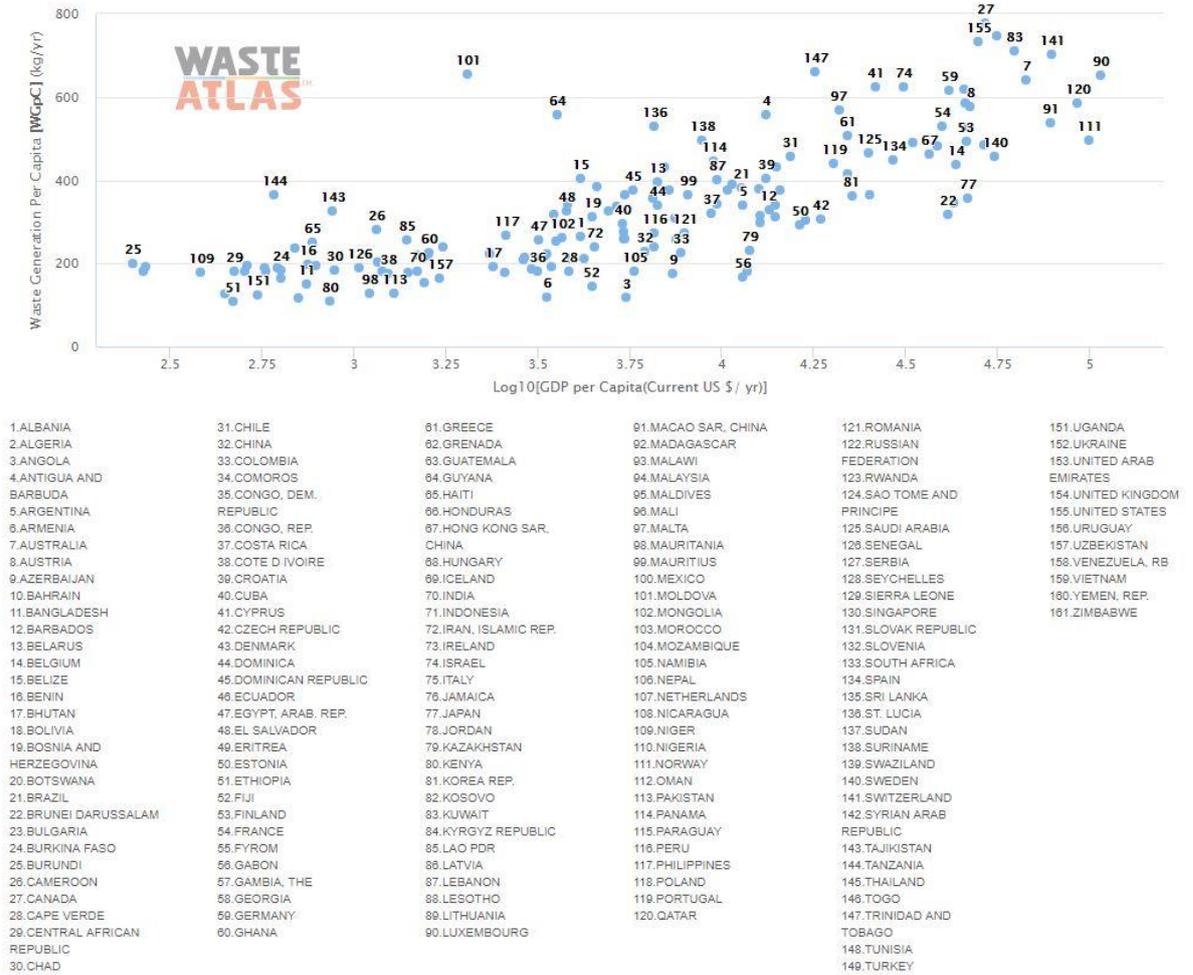


Figura 3. Generación de RSU per cápita según el PBI per cápita por países (US \$/año). Extraído de <http://www.atlas.d-waste.com/>

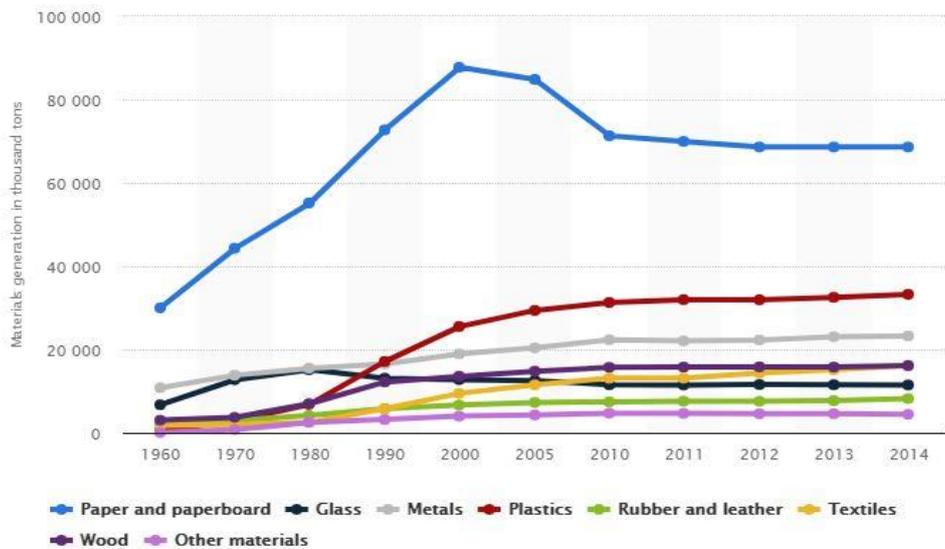


Figura 4. Cantidad de tipos de residuos generados desde 1960 a 2014, en miles de toneladas. Extraído de <https://www.statista.com/statistics/185710/us-materials-generation-in-the-municipal-waste-stream-since-1960/>

- **Época:** la composición de los RSU también varía a lo largo del tiempo, de acuerdo a los padrones de consumo de cada época, como puede verse en el gráfico de la Figura 4, la variación de la composición física de generación de RSU desde 1960 a 2014.

### **1.3. Gestión de RSU**

En la presente sección se describirá brevemente los métodos de gestión de RSU utilizados a lo largo de la historia, y cómo fue acrecentándose la dificultad del manejo de los mismos hasta la actualidad.

#### **1.3.1. Breve historia**

Desde sus orígenes, el hombre ha utilizado los recursos naturales para asegurar su supervivencia y crear objetos que le ayudaran a prosperar dentro de un medio difícil y hostil. Una vez utilizados dichos recursos, se generaban restos, que al provenir principalmente de alimentos y madera, se integraban fácilmente al medio sin afectarlo ni deteriorarlo (Rueda Lillo, 2016). Con el paso del tiempo, el hombre fue formando núcleos de población que comenzaban a demandar cada vez más extracción y transformación de los elementos naturales, generando acumulaciones de los desechos generados. Ante esta situación, la disposición de los mismos normalmente se hacía en la tierra o en el agua, contaminando el ambiente pero sin causar un problema significativo, ya que la población era pequeña, y por lo tanto la tierra tenía la capacidad de asimilarlos.

Conforme al crecimiento de la población y al desarrollo de técnicas mecánicas e industriales, (metalurgia, alfarería, producción de productos químicos, entre otras) las sociedades comenzaron a tener dificultades para eliminar los residuos producidos, formándose así los primeros vertederos. En la Edad Media, la mayoría de estos vertidos eran depositados en las mismas ciudades, lo que originaba problemas de roedores y pulgas, que proliferaban la transmisión de enfermedades como la peste bubónica (Sartor, 2000). A partir del siglo XVIII se empiezan a crear medidas de control para la deposición de estos residuos urbanos como medida importante desde el punto de vista higiénico, creándose redes de alcantarillado. El tratamiento de los residuos generados, se caracterizaba principalmente por un importante aprovechamiento de los residuos orgánicos en el ámbito agrícola como fertilizantes y en el ganadero como alimento.

Posteriormente, las sociedades y los núcleos urbanos fueron creciendo exponencialmente y organizándose en ciudades que respondían a los requerimientos de la producción y el

consumo de su población, en donde, todos los objetos de uso, sean medios de producción o de consumo, son vistos como mercancías, que poco o nada tienen en consideración el impacto en el ambiente natural. Las primeras acciones de gestión de los grandes volúmenes de RSU generados consistían en la acumulación de los mismos en contenedores improvisados en las calles o veredas, una recolección domiciliaria y transporte hacia a los basureros para disposición final sin control u incineración (Crowell Barbalace, 2018). En algunas ocasiones sucedía alguna recuperación de alimentos o materiales reutilizables por parte de personas de muy bajos recursos económicos y en condiciones antihigiénicas. A comienzo del siglo XX se registran en Nueva York los primeros controles de los vertederos y en 1940 se inicia con la instalación de rellenos sanitarios así como de instalaciones adecuadas de compostaje e incineración (Hickman, 2003). En esta sociedad, la composición de los RSU ya era completamente distinta a la de los siglos anteriores, debido a la disminución de los residuos orgánicos de los alimentos y al crecimiento de los productos utilizados como envases, vidrio, cartón y plástico característicos de la sociedad de consumo actual (Wilson, 2008). En la década del `60 muchas personas comienzan a darse cuenta de la incompatibilidad entre las modalidades productivas de la sociedad industrializada y la preservación de los recursos y el medio ambiente, y empiezan a expresarse y a demandar a aquellas actividades industriales que mayor impacto generaban.

### **1.3.2. La problemática de los RSU**

Así es como los RSU comienzan a ser acumulados o abandonados de una forma incontrolada, creando una evidente problemática ambiental, contaminando los medios receptores (aire, suelos y aguas), afectando el paisaje con la consiguiente depreciación del terreno y deterioro del entorno. A continuación se enuncian las principales problemáticas y riesgos de un inadecuado manejo de los RSU (Zurbrügg & Schertenleib, 1998):

- Riesgos sanitarios, derivados del riesgo de contraer o transmitir enfermedades o lesiones a través del contacto con la basura. Principalmente se detecta dicho riesgo en los depósitos incontrolados (ver Figura 5) que además de producir olores desagradables, promueven la generación de roedores, insectos y otros agentes portadores de enfermedades.
- Contaminación de aguas superficiales o subterráneas debido a los líquidos lixiviados generados en los depósitos de basuras o basureros incontrolados

- Molestias a las personas que viven en las proximidades de los basurales por la presencia de polvo, papeles y plásticos que se extienden por los alrededores al ser transportados por el viento. Particularmente, la gran cantidad de plásticos y desechos artificiales constituyen un serio problema, pues producen alteraciones importantes del paisaje en las zonas próximas y a veces distantes de los lugares de descarga de basura. Incluso estos productos no biodegradables, que no se integran en el medio con el paso del tiempo y que no pueden ser mineralizados por los organismos descomponedores, pueden llegar a perjudicar e impedir totalmente los procesos de autogeneración natural de las cubiertas vegetales.

- La falta de un servicio adecuado de recolección de los RSU ocasiona las acumulaciones sin control de basura en las ciudades, reflejado en suciedad en las calles y zonas de esparcimiento y la potencial obstaculización de los drenajes de agua.



Figura 5. Depósito de basura ilegal y sin control de la ciudad de Bahía Blanca.

### 1.3.3. El comienzo de una solución

Dado el mencionado escenario, sumado al aumento de la demanda de materiales recuperados y su potencial comercialización, a nivel mundial, la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano (CNUMH) (también conocida como Conferencia de Estocolmo) convocada por la Organización de Naciones Unidas (ONU) celebrada en Estocolmo, Suecia, entre el 5 y el 16 de junio de 1972, fue la primera gran conferencia de la ONU sobre cuestiones ambientales internacionales, y marcó un punto de inflexión en el desarrollo de la política internacional del medio ambiente, y en particular, sobre

políticas de gestión integral de RSU. Los principios establecidos se centraron en las preocupaciones ambientales, de salud y en la conciencia pública respecto a la reutilización y el reciclaje de materiales residuales. Posteriormente, la *Agenda 21*, de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, firmada por más de 178 países en la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNCED), que tuvo lugar en Río de Janeiro, Brasil entre el 3 y el 14 de junio de 1992, determinó las acciones a aplicar dentro del concepto de gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GIRSU) y bajo la filosofía del desarrollo sustentable. Dichas acciones se corresponden con cuatro principales áreas relacionadas con los desechos:

- Reducción al mínimo de los desechos;
- Aumento al máximo de la reutilización y el reciclado de los desechos;
- Promoción de la eliminación y el tratamiento de los desechos;
- Ampliación del alcance de los servicios que se ocupan de los desechos.

Posteriormente, inspirado por los objetivos antes mencionados, durante la *Cumbre del G8* en junio de 2004, el primer ministro de Japón Koizumi Junichiro<sup>2</sup> presentó la iniciativa de “Las Tres Erres” (3R), la cual propone 3 hábitos estratégicos para el manejo de residuos en busca de un medio ambiente sustentables: Reducir, Reciclar y Reutilizar.

**Reducir:** focalizado en reducir el problema que origina la acumulación de residuos, propone reducir el consumo de bienes y de energía:

- Reducir o eliminar la cantidad de materiales destinados a un uso único (por ejemplo, los embalajes).
- Adaptar los aparatos en función de sus necesidades (por ejemplo, poner lavadoras y lavavajillas llenos y no a media carga).
- Reducir pérdidas energéticas o de recursos: de agua, desconexión de aparatos eléctricos en modo de espera, conducción eficiente, desconectar transformadores, etc.
- Producir minimizando el uso de recursos no renovables. Para ello es necesario el desarrollo de tecnologías que promuevan el desarrollo sustentable

---

<sup>1</sup> Se denomina con el numerónimo G8, al grupo de los ocho países con las economías más industrializadas del planeta. Está conformado por Rusia, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Alemania, Reino Unido y Japón.

<sup>2</sup> Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno del Japón. [www.env.go.jp/recycle/3r/en/outline.html](http://www.env.go.jp/recycle/3r/en/outline.html)

**Reutilizar:** se basa en reutilizar un bien ya sea para extender su uso hasta que realmente no pueda usarse más (yendo en contra de la obsolescencia programada) o para darle otro uso diferente del cual fue originalmente diseñado.

**Reciclar:** significa someter ciertos residuos a un proceso químico para obtener un producto que pueda utilizarse como materia prima en otros procesos productivos. Dichos residuos son los formados principalmente por papel, vidrio, plástico, aluminio, entre otros. Como se dijo anteriormente, el reciclaje de dichos materiales ha tenido una demanda creciente en los últimos años, ya que, si bien el producto obtenido es de una calidad inferior a la materia prima original, el costo económico es menor y puede destinarse a la producción de bienes que no requieran alta calidad de la materia prima. De esta forma, además de disminuir la cantidad de residuos, se disminuye el uso de recursos naturales y se ahorra energía

#### **1.4. Gestión integral de residuos sólidos urbanos**

En los últimos 30 años, el incremento del consumo de productos desechables, descartables o de rápida obsolescencia, junto con el desarrollo urbanístico y el aumento de la densidad de población en muchas ciudades, han dado lugar a un aumento en el volumen de los RSU generados, así como a una distinta composición de los mismos (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). La gestión de los RSU mencionada en el apartado anterior, tanto en grandes como en pequeñas ciudades, se mostró insostenible ante tal aumento de RSU en las zonas urbanas. En dicha gestión, los sistemas de recolección y de transporte muestran grandes deficiencias y la falta de recursos económicos de los organismos responsables de la gestión impide la aplicación de buenas estrategias de mejoramiento.

Guiados e incentivados por los tratados internacionales detallados anteriormente, los países toman cuenta de la necesidad de promulgar leyes que transfieran y motiven a la población los principios de las 3R, dando forma a la denominada GIRSU. En Argentina, la Ley 25.916 (2004) describe a la GIRSU como el conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí, que conforman un proceso de acciones para el manejo de residuos domiciliarios, con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población. La GIRSU comprende las etapas de generación, disposición inicial, recolección, transferencia, transporte, tratamiento y disposición final. De la misma forma, busca promover la valorización de los residuos domiciliarios

(entendiéndose como tal, el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan perjudicar al medio ambiente), a través de la implementación de métodos y procesos adecuados, disminuyendo los residuos con destino a disposición final y minimizando los impactos negativos que estos residuos puedan producir sobre el ambiente. Esta ley también revaloriza la actuación en la gestión de los gobiernos locales, asignándoles un papel muy importante para determinar las condiciones necesarias de un Desarrollo Urbano Sustentable (DUS) en cada una de las ciudades (Guerrero, et al., 2013)

## **1.5. GIRSU en la Unión Europea y Latinoamérica**

A continuación se describirá de forma general la historia y evolución de la GIRSU en la Unión Europea (UE) y América Latina, y luego de forma más puntual, en España y Argentina, países en los cuales se centra la presente tesis.

### **1.5.1. Unión europea**

A partir de las disposiciones de la Agenda 21 de 1992, la UE comenzó un proceso intensivo de análisis de la situación de la gestión de los RSU en el continente, y en base a eso, a determinar directrices para que los estados miembros (EM) tomen medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. La primera directiva que atiende alguno de los problemas de la inadecuada GIRSU es la Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 1994). En esta se establece que los EM velarán por la prevención de formación, la reutilización, la valorización y reciclado de los envases. Con el fin de cumplir dichos principios se establecieron objetivos a alcanzar a más tardar transcurridos cinco años a partir de la fecha de trasposición de la mencionada directiva al Derecho nacional: *valorizar el 50 % como mínimo y, como máximo, el 65 % en peso de los residuos de envases; y reciclar el 25 % como mínimo y, como máximo, el 45 % en peso de la totalidad de los materiales de envasado que formen parte de los residuos de envases, con un mínimo del 15 % en peso por cada material de envasado.*

Posteriormente fueron definiéndose año tras año normativas análogas respecto a la GIRSU, hasta que en 2008 queda definida la última versión consolidada hasta la

actualidad. Es interesante destacar las metas establecidas entre las cuales se exigía a los EM que para finales de 2011, se entregue un informe provisional sobre la evolución de la generación de residuos, sobre el alcance de la prevención de residuos, incluyendo la definición de una política de diseño ecológico de los productos para abordar tanto la generación de residuos como la presencia en los mismos de sustancias peligrosas, con objeto de promover tecnologías centradas en productos duraderos, reutilizables y reciclables (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). Asimismo se pedía la formulación de un plan de acción encaminado especialmente a modificar los actuales modelos de consumo y para finales de 2014, el establecimiento de los objetivos de prevención de residuos y de desvinculación para 2020, basados en las mejores prácticas disponibles. Con respecto al reciclaje de RSU, se constituyó que los EM deberían tomar medidas para fomentar un reciclado de alta calidad y, a este fin, establecer una recolección diferenciada de residuos, para al menos, papel, metal, plástico y vidrio, debiendo alcanzar antes del año 2020 el reciclado del 50% global de su peso de dichos materiales.

En 2002, se aprobó el Reglamento (CE) n° 2150/2002, relativo a las estadísticas sobre residuos, creándose así un marco para las estadísticas armonizadas comunitarias en este ámbito. A partir del año de referencia 2004, el Reglamento establece que los EM de la UE deben facilitar datos sobre la generación, la valorización y la eliminación de residuos cada dos años<sup>3</sup>. De esta forma, pudo comenzarse a evidenciar la evolución de cada país, resaltándose que la generación de RSU variaba considerablemente dentro de los EM, yendo desde 777 kg per cápita en Dinamarca a 261 kg per cápita en Rumania en el año 2016. Las diferencias reflejan los distintos patrones de consumo y de riqueza económica, pero también dependen de cómo se recolectan y gestionan los desechos municipales. Existen diferencias entre los países con respecto al grado en que los residuos del comercio y la administración se recopilan y gestionan junto con los residuos de los hogares. A partir de 2004, las metodologías se unificaron en la mayoría de los países, por lo que la tasa de generación de desechos de 2004 y posterior es más precisa y estable.

---

<sup>3</sup> Actualmente se dispone de datos sobre la generación y el tratamiento de residuos correspondientes a los años de referencia pares de 2004 a 2016, todos disponibles de manera gratuita en la página web <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu>.

En la Tabla 3 se muestran las tasas de generación de los años 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2016, y la diferencia porcentual del período 1995-2016. En 19 de los 31 países (EM de la UE y AELC), la cantidad de residuos municipales generados per cápita aumentó entre 1995 y 2016. Las tasas medias de crecimiento anual más elevadas se registraron en Malta (2,5%), Grecia (2.4%) y Letonia (2.1%), resultando un aumento de 1995 al 2016 del 60,5%, 64,4%, 55,3% respectivamente. Bulgaria mostró la mayor reducción en el período de análisis, con una disminución del 41,8%, seguida de Rumania, 23,7% y Eslovenia, 21,8%. Dicha información también puede verse en el gráfico de la Figura 6, el cual compara la generación de cada país, en kg per cápita, entre 1995 y 2016, y ordenado de mayor a menor nivel de generación en el año 2016. Aunque se están generando más residuos en la UE-28, como se dijo anteriormente, la cantidad total de residuos municipales enviados a disposición final (vertido) ha disminuido. En el período de referencia, el total de residuos municipales depositados disminuyó en 86 millones de toneladas, o 59%, de 145 millones de toneladas (302 kg per cápita) en 1995 a 59 millones de toneladas (116 kg per cápita) en 2016. Esto corresponde a una disminución anual promedio del 4.2%. Para el período 2005-2016, el vertido de residuos ha disminuido en un 5,9% por año en promedio. Como resultado, la tasa de vertido en comparación con la generación de residuos municipales disminuyó del 64% en 1995 al 24% en 2016.

A mediados de los 90 también comienzan a considerarse la erradicación de los vertederos sin control, estableciendo directrices que hablan de que en el futuro, sólo deberán realizarse en la comunidad actividades de vertido seguras y controladas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente mundial, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del vertedero. Además, la directiva 31/1999 sobre vertederos estipuló que los EM estaban obligados a reducir la cantidad de residuos municipales biodegradables que van a vertederos al 75% para el 16 de julio de 2006, al 50% para el 16 de julio de 2009 y al 35% para el 16 de julio de 2016 (Consejo de la Unión Europea, 1999). La reducción se calculó sobre la base de la cantidad total de residuos municipales biodegradables producidos en 1995. De esta forma, los vertederos con y sin control comenzaron a ser cada vez menos utilizados, por un lado, por el

aumento de la valorización de los RSU a través del reciclaje y compostaje, y por otro lado, por la instalación de incineradoras con recuperación de energía.

Tabla 3. Generación de RSU por habitante (kg/año) en la UE y en sus países miembros. Construida a partir de la información de la página de Eurostat<sup>4</sup>

País/Año	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Variación% 1995-2016
Unión Europea	:	521	515	504	481	482	1,9
Bélgica	455	471	482	456	412	420	-7,7
Bulgaria	694	612	588	554	419	404	-41,8
República Checa	302	335	289	318	316	339	12,3
Dinamarca	521	664	736	:	789	777	49,1
Alemania	623	642	:	602	632	627	0,6
Estonia	371	453	433	305	359	376	1,3
Irlanda	512	599	731	624	:	:	
Grecia	303	412	442	532	488	498	64,4
España	505	653	588	510	456	443	-12,3
Francia	475	514	530	534	517	511	7,6
Croacia	:	262	336	379	393	403	
Italia	454	509	546	547	486	497	9,5
Chipre	595	628	688	689	638	640	7,6
Letonia	264	271	320	324	404	410	55,3
Lituania	426	365	387	404	448	444	4,2
Luxemburgo	587	654	672	679	607	614	4,6
Hungría	460	446	461	403	377	379	-17,6
Malta	387	533	623	601	606	621	60,5
Holanda	539	598	599	571	523	520	-3,5
Austria	437	580	575	562	560	564	29,1
Polonia	285	320	319	316	286	307	7,7
Portugal	352	457	452	516	460	461	31,0
Rumania	342	355	383	313	247	261	-23,7
Eslovenia	596	513	494	490	449	466	-21,8
Eslovaquia	295	254	273	319	329	348	18,0
Finlandia	413	502	478	470	500	504	22,0
Suecia	386	428	477	439	447	443	14,8
Reyno Unido	498	577	581	509	483	483	-3,0
Islandia	426	462	516	484	588	656	54,0
Noruega	624	613	426	469	421	754	20,8
Suiza	600	656	661	708	725	720	20,0
Montenegro	:	:	:	:	503	518	
Yugoslavia	:	:	:	351	380	385	
Albania	:	:	:	:	:	:	
Serbia	:	:	:	363	259	268	
Turquía	441	465	458	407	400	426	-3,4
Bosnia y Herzegovina	:	:	:	332	:	:	
(: ) Dato no disponible							

<sup>4</sup>[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)

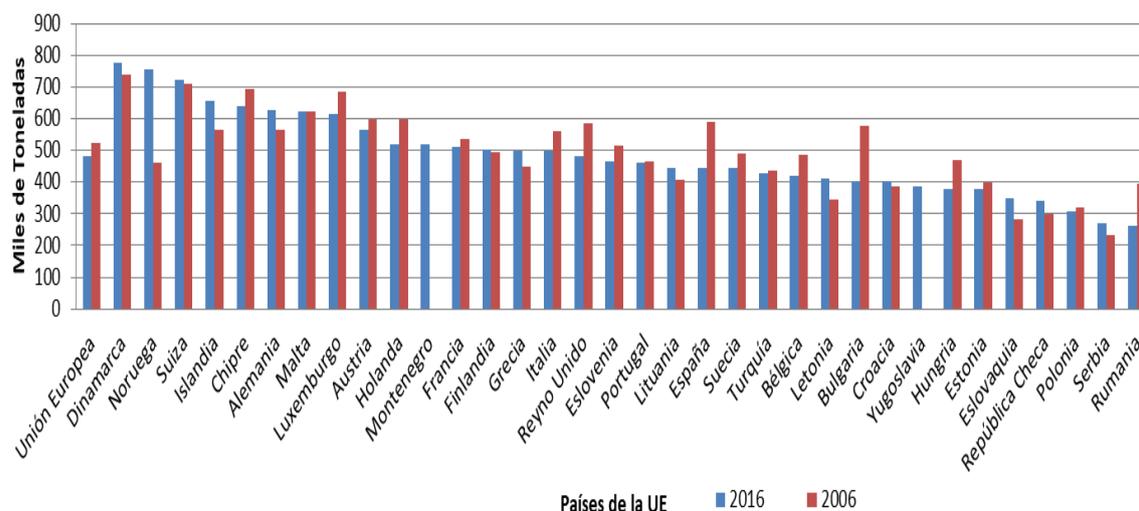


Figura 6. Generación de RSU 2016-2006 por países de la UE, en miles de toneladas de RSU

Como puede observarse en los datos de la Tabla 4, extraídos de la página web de la Eurostat, la cantidad depositada en rellenos sanitarios, en kg por habitante para la media de la UE, descendió en casi un 62% en el período 1995-2016, mientras que dicha cantidad enviada a incineración aumentó en un 95,5% y en un aproximado 70% para reciclaje y compostaje. En términos totales, desde 1995, la cantidad RSU incinerados aumentó en 34 millones de toneladas o 106% y representó 66 millones de toneladas en 2016. Cabe resaltar que este último método permite recuperar la energía del residuo pero también conlleva problemas ambientales como son los gases tóxicos generados durante la incineración, que necesitan un tratamiento añadido, y las cenizas resultantes, que deben ser dispuestas en vertederos controlados.

La cantidad de RSU reciclados aumentó de 25 millones de toneladas (52 kg per cápita) en 1995 a 71 millones de toneladas (141 kg per cápita) en 2016 a una tasa anual promedio del 5,1%. La participación de los residuos municipales reciclados en general aumentó del 11% al 29%. Este aumento puede atribuirse en parte a la aplicación de la legislación europea mencionada, por ejemplo, la directiva 62/1994 sobre envases y residuos de envases. En 2001, los EM tuvieron que recuperar un mínimo del 50% de todos los envases puestos en el mercado. Con el objetivo de recuperación del 60% para el 31 de diciembre de 2008, hubo un aumento adicional en la cantidad de residuos de envases recolectados por separado. La recuperación de material orgánico mediante el compostaje ha crecido a una tasa anual promedio del 5,1% entre 1995 y 2016. El reciclaje y el compostaje en conjunto representaron el 46% en 2016 en relación con la generación de residuos.

Tabla 4. Cantidades enviadas a Relleno Sanitario, Incineración, Reciclaje, Compostaje y Otras formas<sup>5</sup>.  
Unión Europea 1995-2016

Destino de RSU generados en la UE							
	1995	2000	2005	2010	2015	2016	Variación % 1995-2016
Millones de Toneladas							
Relleno Sanitario	145	140	110	92	61	59	-59,3
Incineración	32	39	48	57	65	66	106,3
Reciclado	25	40	52	62	71	71	184,0
Compostaje	14	24	29	35	39	40	185,7
Otros	10	11	16	6	7	8	-20,0
Kg per cápita							
Relleno Sanitario	302	288	221	184	121	116	-61,6
Incineración	67	75	98	115	130	131	95,5
Reciclado	52	82	105	125	140	141	171,2
Compostaje	30	40	59	69	78	80	166,7
Otros	22	25	33	12	14	13	-40,9

Una de las evoluciones más significativas en la política ambiental de la Unión Europea de los últimos años ha sido el reconocimiento de la importancia de los instrumentos económicos a la hora de aplicar políticas en torno a la GIRSU (Unión Europea, 2017). Tras acumular casi 30 años de experiencia, la UE ha reconocido que las políticas tradicionales basadas en la emisión de normativas y su control no son suficientes, sino que, para una correcta GIRSU en las sociedades modernas, es indispensable incorporar una eficiente e inteligente red de incentivos y desincentivos que trabajen en la dirección adecuada. Disponer de la normativa apropiada y de la infraestructura idónea (contenedores, medios de transporte, plantas de separación, rellenos sanitarios, etc.) son precondiciones esenciales y necesarias, pero no suficientes. Su complemento imprescindible son los mecanismos económicos que animen a los actores sociales a actuar en la dirección adecuada. Si bien son fundamentales las campañas de sensibilización ciudadana a favor de la separación en origen y de la recolección selectiva, a favor del consumo de productos reciclados y de la modificación de hábitos de consumo

<sup>5</sup> La categoría "otros tratamientos" se calculó como la diferencia entre la suma de las cantidades tratadas y las cantidades de desechos generadas. Esta diferencia surge en los países que tienen que estimar la generación de desechos en áreas no cubiertas por un sistema municipal de recolección de residuos y, por lo tanto, informan más desechos generados que tratados. Además, la categoría "otros tratamientos" refleja los efectos de la importación y exportación, las pérdidas de peso, el doble recuento de residuos secundarios (por ejemplo, vertido y reciclado de residuos de la incineración), las diferencias debidas a retrasos, el almacenamiento temporal y, cada vez más, el uso de pretratamiento, como el tratamiento biológico mecánico

(Saladiè & Santos-Lacueva, 2016), es necesario complementar esa educación con la política de incentivos y desincentivos económicos.

En el gráfico de la Figura 7 se muestran los datos de generación y reciclaje de 2016, desagregado en 20 países de la UE. Cabe destacar el caso de Eslovenia, un país que en sólo una década, ha alcanzado una tasa promedio de recolección selectiva del 55%, llegando al 61% en Liubliana, su capital. Asimismo, sus habitantes generan menos de la mitad de residuos no reciclables que el resto de la UE: 414 kg/habitante por año. Cabe recordar que antes de su entrada en la UE en 2004, en Eslovenia no existía la recolección selectiva. De esta forma, la capital eslovena es la primera de Europa en alcanzar el objetivo cero residuos, con una tasa de reciclaje 20% superior a la media europea y diez puntos por encima de los objetivos de la UE para 2020. Además, se ha comprometido a reducir a la mitad la cantidad de residuos generados y a aumentar la recolección selectiva hasta el 78% para 2025. Se utiliza un sistema de recolección puerta a puerta por contenedores diferenciados, a cargo de *Snaga*, una empresa pública de gestión de residuos en Liubliana y en 9 municipalidades suburbanas, dando servicio a una población de unos 380.000 habitantes. Otro hecho destacable es que la ciudad ha evitado recurrir a la incineración para eliminar sus residuos y puso en evidencia que el sistema de recolección puerta a puerta no sólo es efectivo en pequeñas poblaciones, sino también en grandes ciudades. Todo ello manteniendo los costes de gestión de residuos entre los más bajos de toda la UE<sup>6</sup>.

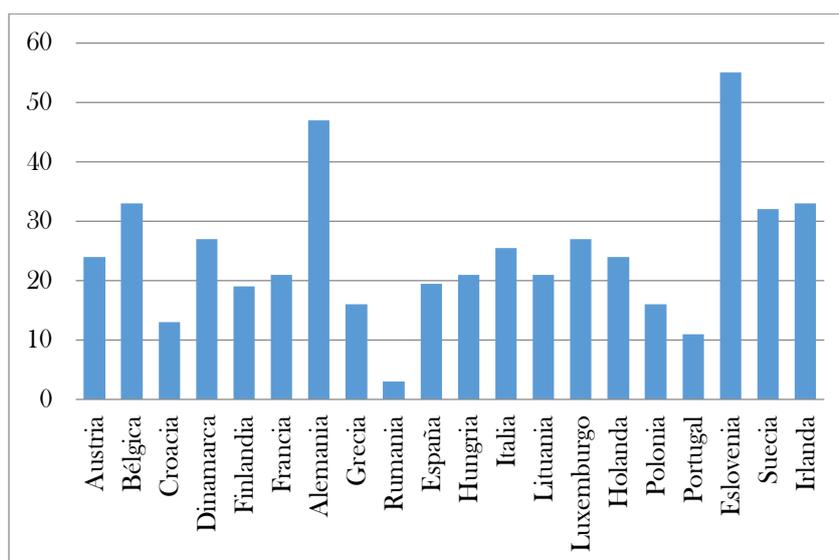


Figura 7. Porcentaje de RSU reciclado en algunos países de la UE. Construido a partir de los datos brindados en la página [www.atlas.d-waste.com](http://www.atlas.d-waste.com)

<sup>6</sup> <https://www.residuosprofesional.com/liubliana-hacia-residuo-cero/>

### 1.5.2. España

España, como país miembro de la UE, se ha regido por la anteriormente descrita directiva marco 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos, para crear su ley nacional de residuos, Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados. Hasta la década de los ochenta, todos los residuos municipales de España eran depositados en vertederos controlados y sin control o ilegales. A partir de 1992, con los inicios de las iniciativas de la UE en pos de una GIRSU, comienzan a erradicarse los basurales sin control y a promoverse la recolección selectiva y el aprovechamiento de determinados materiales contenidos en los residuos mediante sistemas de tratamiento diferenciados del vertido.

En 2013 se adoptó el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 y, en 2015, el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022, (PEMAR) en virtud de la directiva marco sobre los residuos. El mismo establece las directrices estratégicas para la gestión de residuos durante los próximos seis años y las medidas necesarias para alcanzar los objetivos de la UE. El objetivo último es sustituir modelos lineales de producción por modelos circulares que reintegren los materiales de desecho en la línea de producción. El PEMAR aplica la jerarquía de residuos sobre la que se sustenta la legislación de la UE en materia de residuos. El plan introduce una obligación de resultados para las Comunidades Autónomas, imponiendo a las regiones la alineación y revisión de sus estrategias nacionales con el fin de alcanzar los objetivos específicos del plan estatal. Sin embargo, según los informes que realiza la UE, España no está bien posicionada dentro de los EM, y dista mucho de cumplir con los objetivos establecidos (Asociación Observatorio de la Sostenibilidad, 2016).

La responsabilidad sobre la gestión de los residuos se divide en tres niveles (Artaraz Miñón, et al., 2012). En el primer nivel, la Administración estatal tiene competencia exclusiva para elaborar y aprobar la legislación básica de protección del medio ambiente. Fruto de esta competencia, el Estado elabora los Planes Nacionales de Residuos y promulga leyes, reales decretos y órdenes. En un segundo nivel, están las Comunidades Autónomas (ver el mapa de España en la Figura 8) que ejecutan la legislación estatal y tienen potestad para establecer normas adicionales de protección más restrictivas. En muchas autonomías es el órgano ambiental de la Comunidad Autónoma el encargado de la gestión de los RSU. Las autoridades locales se encuentran en el tercer y último nivel, como principales responsables del desarrollo de infraestructura, implementación y

evaluación de las políticas de gestión de residuos. Éstas determinan su política y elaboran sus planes de gestión, optan entre las diferentes opciones de infraestructuras y tecnologías de tratamiento disponibles, considerando para ello tanto los factores institucionales, técnicos y tecnológicos como los económicos, legislativos y sociales (Alvarez, et al., 2010). Al igual que en los países comunitarios de la UE, la mayoría de los ayuntamientos subcontratan los servicios de recolección y tratamiento al sector privado.



Figura 8. España y sus Comunidades Autónomas

En los últimos años, ha habido una reducción en la generación de RSU. Como se puede observar en la Tabla 3, la cantidad media en España (443 kg/habitante/año) está por debajo de la media de la UE (483 kg/habitante/año).

En la Figura 9 se ilustran la cantidad de RSU en función del tratamiento en kg per cápita, y muestra un ligero aumento en la incineración, y una reducción en el depósito en vertederos y en el reciclaje-compostaje. Según los datos de 2016, el 56 % de los residuos municipales de España se deposita en vertederos, dato muy superior a la media de la UE del 28 %, siendo Andalucía, Madrid, Comunidad Valenciana y Canarias las regiones que más lo emplean. Las regiones que mayores cantidades de residuos incineran son Cataluña, Galicia, Baleares y Madrid.

En la Figura 10 se afirma la disminución de la eficiencia del reciclaje ya que también ha disminuido, desde el año 2013, el porcentaje de RSU reciclados y compostados llegando

a registrar 29,7%, valor muy alejado del 50% requerido por la UE para el 2020 (Unión Europea, 2017).

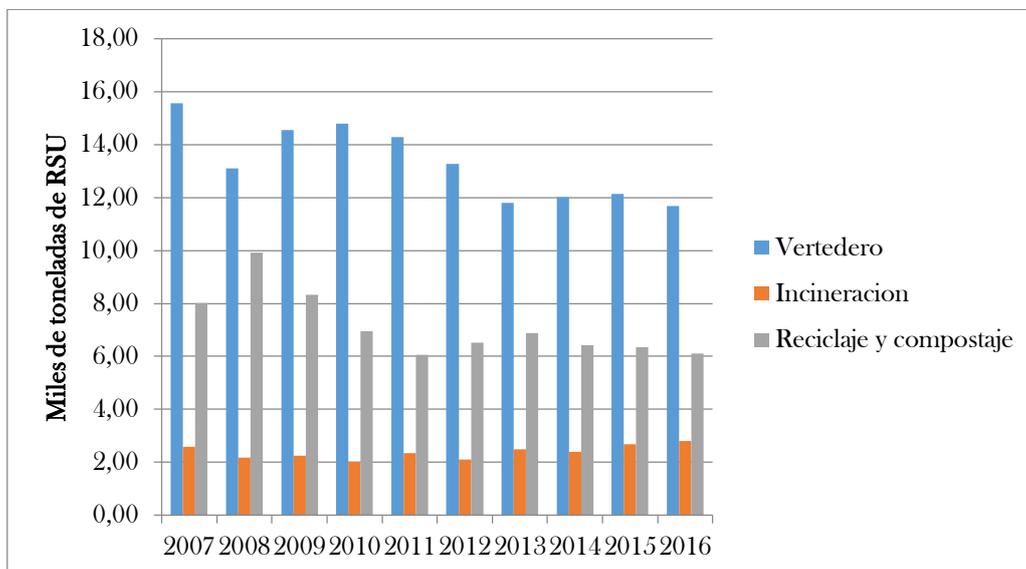


Figura 9. Destino de los RSU en España, en kg per cápita anuales, 2007-2016. Gráfico construido a partir de la página Eurostat

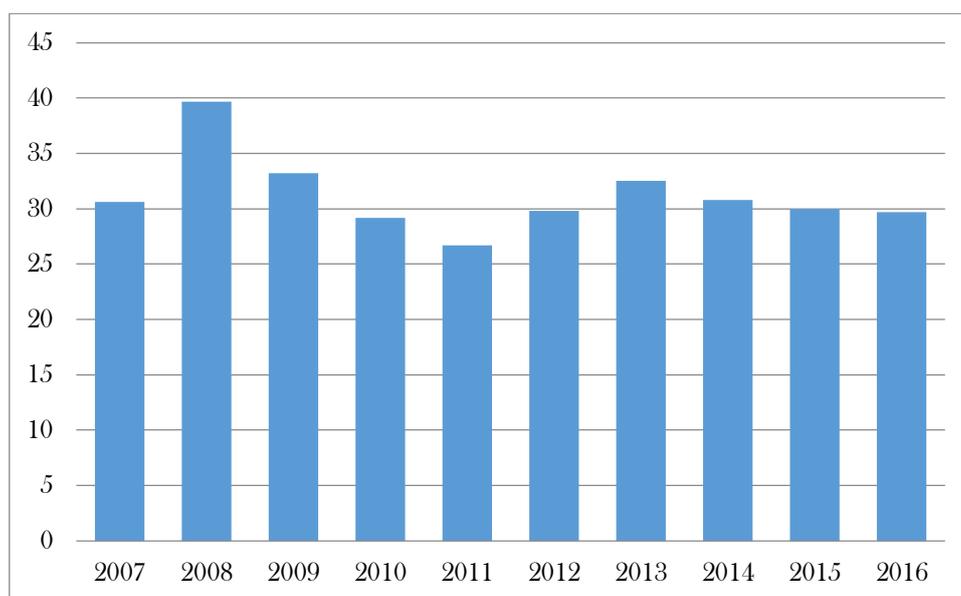


Figura 10. Tasa de RSU reciclados y compostados en España del 2007 al 2016. Gráfico construido a partir de la página Eurostat

Asimismo, los vertidos ilegales o que no cumplen la normativa son todavía un problema que la comisión de la UE sigue muy de cerca y aplica las sanciones correspondientes en los incumplimientos encontrados en España (Unión Europea, 2017). Cabe resaltar que el uso de impuestos al vertido, una herramienta que parece efectiva para la disminución de residuos enviados a vertederos, prácticamente no existe en España. Sólo la Comunidad Autónoma de Cataluña aplica desde 2004 un impuesto a los titulares de los vertederos

por el depósito de los residuos municipales y asimilables. En comparación, los países con los impuestos más altos por el uso de vertederos reportan las más bajas tasas de vertido de residuos (como Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, entre otros), mientras que en España, se mantienen costes de vertido bajos o nulos y, en consecuencia, el vertedero es el principal destino de sus residuos. Respecto a los sistemas de imposición diferenciada sobre el conjunto de ciudadanos, en España el importe de las tasas por prestación de los servicios de recolección, transporte y eliminación de residuos sólidos, en general se determina en función del coste efectivo del servicio prestado y no pretende jugar un papel incentivador de comportamientos sustentables (Artaraz Miñón, et al., 2012). De hecho, las experiencias de los sistemas de pago por generación son minoritarias, sólo registradas en Cataluña.

Por otro lado, la tasa que pagan los ciudadanos por la recolección y gestión de los residuos es muy reducida en relación con la mayoría de países europeos, ya que apenas supone un tercio de lo que se paga en países como Alemania, Dinamarca y Países Bajos. De esta forma el sistema de tasación vigente no contribuye a paliar el déficit generado en la prestación del servicio municipal de GRSU. Para ello se han creado los Sistemas Integrales de Gestión (SIG) cuyo objetivo es financiar el coste del sistema de recolección, transporte y tratamiento de los residuos, y compensar a las entidades locales que participen en ellos, mediante fondos obtenidos de las empresas adheridas al SIG. Las autoridades competentes para aplicar esta medida son las estatales, que firman los convenios con las empresas productoras de las fracciones de residuos para las que después se crea el SIG. Estos sirven como una herramienta que permite el cumplimiento del principio de responsabilidad del productor. Las asociaciones que integran los SIGs, además de proporcionar asesoramiento técnico, son las responsables directas de la gestión del proceso de reciclado, que incluye recolección, transporte, clasificación y envío de los residuos a los gestores autorizados.

La Ley 11/1997 de envases y residuos de envases fue pionera en la implantación de los SIGs, que posteriormente han ido extendiéndose a otras fracciones de residuos. En la Tabla 5 se muestran las asociaciones de los SIGs con mayor implantación en España. *Ecoembes* es desde 1996 la asociación encargada del reciclaje de envases de uso doméstico. Doce años después de su creación, en 2008 estaban adheridas a este SIG 12.376 empresas envasadoras (Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2009). Para el reciclaje de los envases de vidrio, en 1982 algunas Comunidades Autónomas,

Corporaciones Locales y fabricantes de vidrio comenzaron a colaborar, y en 1995 se creó *Ecovidrio*, que tiene actualmente más de 2.000 empresas envasadoras adheridas. *Ecopilas*, implantado en 2.002, fue el primer SIG para gestionar pilas y acumuladores. *Sigre*, por su parte, es uno de los principales SIGs de medicamentos creado por la industria farmacéutica española. La plataforma de la gestión logística de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos es *OfiRae*, que actúa como punto de encuentro y coordinación de todos los agentes que participan en el reciclaje: los SIGs autorizados, los entes locales y los puntos limpios.

Dado que los SIGs son organizaciones sin ánimo de lucro, cuyo ámbito de actuación se limita a los residuos objeto de su autorización en función de su naturaleza comercial y no ambiental, determinadas corrientes de residuos, como los periódicos y las revistas usadas (sobre cuya producción no se aplica el principio de responsabilidad del productor) no son financiadas por *Ecoembes* como SIG responsable de los envases de papel/cartón, aunque la composición de los residuos de cuya recogida se encarga sea la misma. Algo similar sucede con el SIG responsable de la recolección y tratamiento de lámparas *Ambilamp*, que sólo recoge determinados tipos de lámparas.

Tabla 5. Asociaciones de los SIGs con mayor implantación en España

Flujo de residuo	Fracción de residuo	Asociación
Envases	Envases de Vidrio	Ecovidrio
	Envases ligeros <sup>7</sup>	Ecoembes
	Envases fitosanitarios	<i>Sigfito Agreenvases</i>
Residuos peligrosos del hogar	Medicamentos	<i>Sigre</i>
	Pilas y acumuladores	<i>Ecopilas</i> <i>Ecolec</i>
Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	Aparatos de alumbrado	<i>Ambilamp</i> <i>Ecolum</i> <i>Gerelux</i>
	Grandes y pequeños electrodomésticos	<i>Ecolec</i>
	Aparatos eléctricos y electrónicos	<i>Ecorae's</i> <i>Ecoasimelec</i>
	Equipos informáticos	<i>Ecofimática</i> <i>Ecotic</i> <i>Tragamovil</i>

Según el informe de Sostenibilidad en España, 2016, desde el año 1998 la tasa de reciclaje de residuos de envases domésticos subió de un 4,8% a un 73,3%. El sistema de recolección de envases encargado por *Ecoembes*, da cobertura al 99% de la población. En el año 2015 se recolectaron mediante dicho sistema de recolección selectiva,

<sup>7</sup> El término ligero se aplica a los envases de uso y consumo doméstico, para distinguir éstos de los envases utilizados exclusivamente en las industrias, comercios, servicios o explotaciones agrícolas y ganaderas.

1.300.339 toneladas de residuos de envases, distribuidos en: 445.051 toneladas de plásticos (34,23%), 267.896 toneladas de metales (20,60%), 580.585 toneladas de papel y cartón (44,65%), y 6.807 toneladas de madera (0,52%). La recolección selectiva, basada en la deposición por la ciudadanía de diferentes materiales de desecho en contenedores específicos, es la que hace posible estas cifras. Los contenedores son de dos tipos: el contenedor amarillo se ocupa de los envases de plástico, envases metálicos y briks; el contenedor azul recibe los envases de papel y cartón. En 2015 el número total de estos contenedores se elevó a 566.957 (366.339 amarillos y 200.618 azules), lo que supuso un incremento del 2,5%. Las ratios por habitante también se elevaron en 2015 los envases depositados en el contenedor amarillo suponen una ratio de 12,7 kg/habitante y los depositados en el contenedor azul representan 15,1 kg/habitante. En ambos casos el incremento respecto al año anterior es de 0,4 kg por habitante.

En el año 2017, se recolectaron 819.788,7 toneladas de vidrio a través de la organización *Ecovidrio*. La tasa media de reciclaje de vidrio por ciudadano es de 17,6 kg. En la Tabla 6 se observa el aumento de la cantidad de vidrio recolectada del 2013 al 2017, y sus fuentes de colección.

Tabla 6. Cantidad de vidrio recuperada por el SIG *Ecovidrio* en España, 2013 a 2017. Adaptado de [www.Ecovidrio.com](http://www.Ecovidrio.com)

Año	Toneladas de Vidrio Recuperadas por <i>Ecovidrio</i>		
	Contenedor	Residuo Urbano	Total
2017	789.235,57	30.553,13	819.788,7
2016	753.509,18	27.523,64	781.032,82
2015	724.657,2	21.061,03	745.718,23
2014	694.325,34	31.409,08	725.734,42
2013	687.683,44	6.325,98	6.949,42

Como indica el mismo informe, en 2015, la industria española de la recuperación y el reciclado de papel y cartón continuó creciendo, con una tasa de recolección del 70%, en línea con la media europea, se recolectaron, trataron y reinsertaron en el sistema más de 4.584.000 de toneladas de residuos de papel y cartón, un 3,3% más que en el año 2014, superándose los objetivos establecidos por la legislación europea y española. Este dato se refiere a la recolección global procedente del canal municipal, comercial e industrial. De esas 4.584.000 toneladas se exportaron 1.014.000, frente a las 1.628.000 importadas durante el mismo año por el país, para abastecer un consumo total de 5.198.000 de toneladas. La tasa de recolección se situó en el 70% y la tasa de reciclaje en el 79%, una

de las mayores de Europa. El 78% de la producción se destinó al mercado interno y el 22% restante a otros países. Estos datos consolidan el escenario de crecimiento positivo iniciado en el 2014. Específicamente, el canal municipal, con 568.000 toneladas (el 12,4%) experimentó un ligero aumento en 2015 debido principalmente a tres factores: un mayor consumo, el compromiso de los ciudadanos, que depositaron en el contenedor azul 12,2 kilos de papel y cartón, y al buen funcionamiento de los sistemas de recolección municipales. La industria papelera española, es la segunda que más papel recuperado utiliza para fabricar papel nuevo de Europa. La capacidad de recuperación y reciclado del sector, que recoge el 70% de todo el papel y cartón que se consume en España, garantiza el abastecimiento sostenible de esta materia prima secundaria a la industria papelera contribuyendo al crecimiento de toda su cadena de valor. Asimismo, en el sector actúan 114 empresas asociadas que dan empleo directo a 5.671 personas y de las que dependen 17.283 empleos indirectos, facturando en 2015 un total de 2.300 mil de euros.

Según un informe de la Comisión Europea, sobre la revisión de la aplicación de la normativa medioambiental de la UE en España (BiPRO and the Copenhagen Resource Institute (CRI) in cooperation with ENVIRON, ENVIROPLAN, Geotest and ACR+, 2015), las causas subyacentes de la actual distancia con respecto de los objetivos de la UE en materia de residuos son: la falta de incentivos para la gestión de los residuos según la jerarquía de residuos; una recolección selectiva (puerta a puerta) insuficiente; la falta de coordinación entre los distintos niveles administrativos; los sistemas insuficientes de responsabilidad ampliada del productor (RAP); y la gestión insuficiente de los bioresiduos.

Dentro de España, respecto a la GIRSU, se presentan diferencias considerables entre las Comunidades Autónomas (Alvarez, et al., 2010) (ver Figura 11). Cataluña es la Comunidad Autónoma en donde se recolecta mayor cantidad de residuos de forma diferenciada, seguida de Madrid, Andalucía y el País Vasco; las comunidades con menores ratios de recolección selectiva son La Rioja, Cantabria, Ceuta y Melilla. En el País Vasco y Navarra es donde más vidrio y papel/cartón se recicla, y Cataluña donde la recuperación de envases metálicos es mayor.

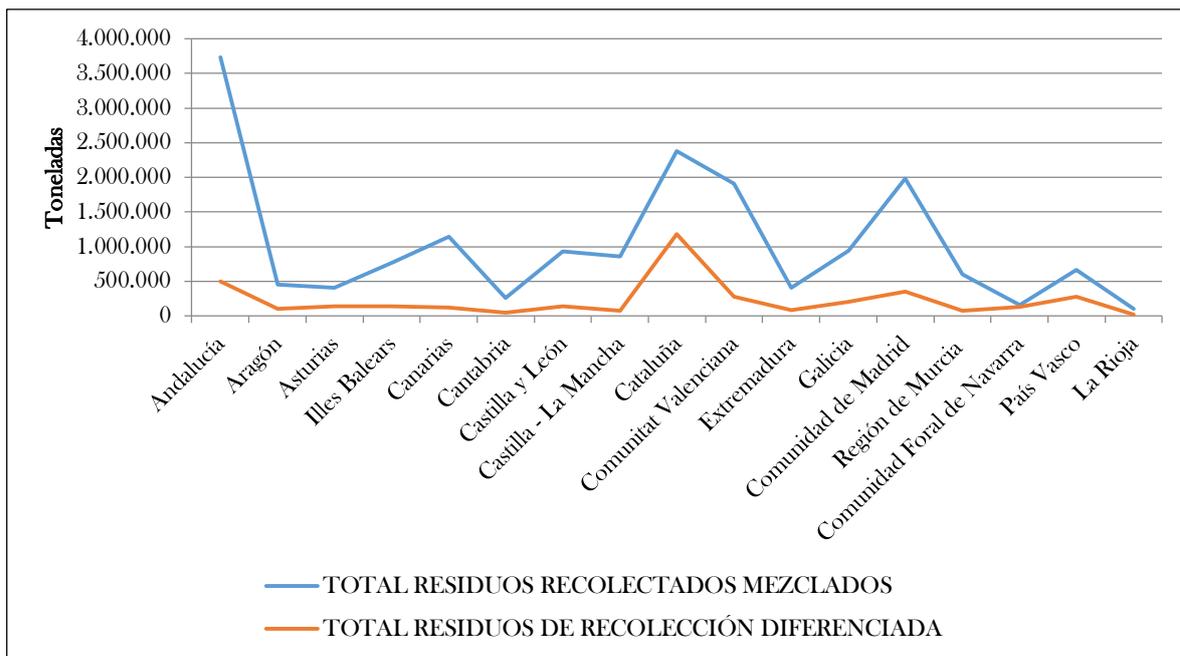


Figura 11. RSU recolectados mezclados vs RSU recolectados recuperados en España en el año 2015. Elaboración propia en base a los datos de la página web [www.ine.es](http://www.ine.es)<sup>8</sup>.

### 1.5.3. América latina y el caribe

Hasta 1991 el problema de los RSU y residuos industriales era un tema no resuelto en la región de América Latina y el Caribe (ALC) y, en general, mal abordado. Existían múltiples enfoques en torno a los impactos en la salud y en el medio ambiente generados por los residuos domésticos e industriales. A partir de la *Agenda 21* realizada en 1992 por la ONU en Río de Janeiro, muchos países latinoamericanos, con miras a cumplir con las metas propuestas en dicho programa, modificaron su legislación ambiental para, seguidamente, diseñar planes de GIRSU, tanto a nivel nacional como municipal adaptados a las necesidades de cada región o zona. Sin embargo, desde entonces ha prevalecido el manejo de los residuos bajo el esquema de “recolección y disposición final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos, así como la disposición final sanitaria y ambientalmente adecuada (Sáez & Urdaneta G., 2014).

Asimismo, la generación de RSU per cápita ha registrado severos aumentos en los últimos años pero la infraestructura para su gestión, aprovechamiento y disposición final adecuada no van de la mano con dicho crecimiento. Según el Banco Mundial (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012), en ALC se producen 1,1 kg de RSU per cápita por día, lo que representa alrededor de 440.000 toneladas diarias o el 12% del total mundial. La cantidad de residuos per cápita por día es ligeramente inferior al promedio del mundo, y se

<sup>8</sup> [www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t26/e068/p01/serie/10/&file=02003.px](http://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t26/e068/p01/serie/10/&file=02003.px)

proyecta que aumente a 1,6 kg hacia 2025, lo que supone unas 730.000 toneladas diarias. En el gráfico de la Figura 12 se muestran las generaciones per cápita por países, dando a Chile, Panamá y Brasil como los mayores generadores de la región. Junto con Asia, ALC tiene las mayores tasas globales de aumento de residuos per cápita, por encima del promedio mundial. El Banco Mundial concluye que, hacia 2025, el costo económico de manejar los residuos será cuatro veces mayor en los países de ingresos medios, como los latinoamericanos.

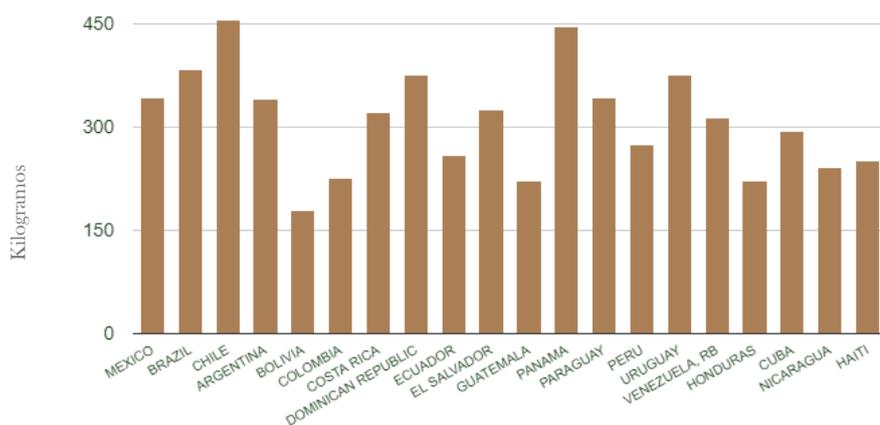


Figura 12. Generación de RSU per cápita en los países de América Latina y el Caribe. Año 2014. Adaptado de la información de la página web [www.atlas.d-waste.com](http://www.atlas.d-waste.com)

En muchos países de la región todavía se utilizan los vertederos y/o basurales a cielo abierto (BCA) sin las debidas especificaciones técnicas. Sólo el 54,4% de los RSU se depositan en rellenos sanitarios, el 18,5% en vertederos controlados, y el 23,3% en vertederos a cielo abierto, lo que deriva en enormes riesgos sanitarios e impactos ambientales (CEPAL, 2018). La práctica predominante en los municipios es la recolección sin clasificación y/o separación de los desechos en origen. En la composición de los RSU predomina los desechos orgánicos putrescibles: para un 70% de los países se tiene que este tipo de desechos representa más del 50% del total de desechos municipales. El promedio de reciclaje como porcentaje del total de los RSU que se producen es muy bajo en la región, nulo o no se registran datos de dichas cantidades. Esto puede observarse en la Figura 13 donde algunos países de ALC no aparecen por no suministrar los datos oficiales al respecto. Por el contrario, Colombia presenta la mayor tasa de reciclaje dada por un 20%. Los porcentajes bajos de materiales reciclables pueden ser ocasionado por el nivel socioeconómico de los pobladores, sus patrones de consumo y el hecho de que en muchos de esos países los materiales reciclables son recuperados por sectores informales en las distintas etapas funcionales del manejo de residuos sólidos

(Espinoza, et al., 2011). Es decir, existe un enorme número de segregadores trabajando en las calles y en los vertederos, buscando sobrevivir del aprovechamiento de materiales reciclables a pesar del riesgo a que exponen su salud e integridad física. Por este motivo, las políticas de formalización de recicladores, la aplicación de criterios de responsabilidad extendida del productor y la mejora de los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final abren una multitud de oportunidades económicas con beneficios sociales y ambientales.

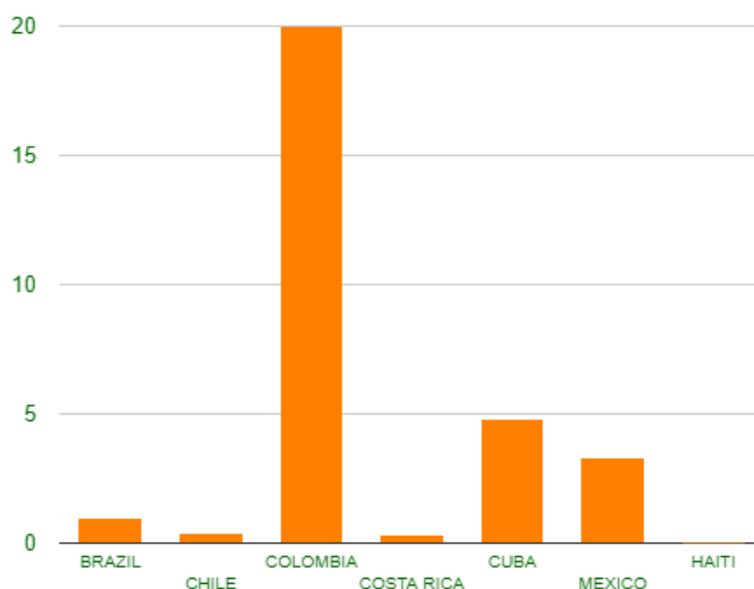


Figura 13. Porcentaje de recuperación de RSU en América Latina y el Caribe. Año 2014. Adaptado de la información de la página web [www.atlas.d-waste.com](http://www.atlas.d-waste.com)

En ALC, la GRSU es un servicio costoso que consume entre 20 y 50 % de los presupuestos operacionales disponibles para los servicios municipales. El porcentaje de la cobertura de recolección en general registra índices superiores al 75%, sin embargo en Bolivia y Honduras dicho valores son 57% y 65% respectivamente, siendo los más bajos de la región, mientras que Argentina, Venezuela, Chile y Uruguay alcanzan valores muy cercanos al 100% de cobertura<sup>9</sup>. Los no servidos son casi siempre la población creciente de bajos ingresos concentrada en las áreas periurbanas.

La regionalización ha emergido como una herramienta valiosa en la gestión de los RSU. Los recursos limitados para financiar las actividades de gestión y otras restricciones han llevado a muchas comunidades rurales y pequeñas comunidades a perseguir la regionalización como un medio para implantar GRSU y otros programas de gestión

<sup>9</sup> [www.atlas.d-waste.com](http://www.atlas.d-waste.com)

regional. Las ventajas incluyen mayor flexibilidad y economías de escala más grandes, mientras que las limitaciones incluyen metas de gestión posiblemente conflictivas y desigualdad potencial entre comunidades. En este sentido, se han emitido guías de “buenas prácticas” para iniciar planes de regionalización y casos de estudio que ilustran proyectos exitosos basados en la confianza pública, corporaciones públicas no lucrativas, acuerdos intergubernamentales y consejos regionales. Asimismo, muchas organizaciones como el CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), BID (Banco Interamericano de Desarrollo), OPS, el Banco Mundial, entre otras, llevaron a cabo iniciativas y experiencias de GRSU en pos de incentivar y financiar a gobiernos latinoamericanos. Por ejemplo, CEPAL desarrolló un proyecto para la gestión ambientalmente adecuada de los RSU y residuos industriales con el apoyo financiero del gobierno de Alemania (GTZ), trabajando en los últimos años en 6 países: Argentina (Municipio de Córdoba); Brasil (Municipalidad de Campiñas, Sao Paulo); Colombia (Municipalidad de Cartagena de Indias); Costa Rica y Chile (alcance nacional); y finalmente, en Ecuador (Municipalidad de Quito).

Los gobiernos de países como México, Argentina y Venezuela entre otros, han presentado dificultades para implementar las nuevas normativas, debido a que la gestión de residuos sólidos tiene como característica la falta de continuidad, ocasionada por los cambios en las administraciones municipales, impidiendo la profesionalización y sustentabilidad del sector. Aunado a esto la deficiencia presupuestaria de los organismos competentes de la GRSU hacen que los esfuerzos realizados sean descoordinados e ineficientes (Espinoza, et al., 2011).

#### **1.5.4. Argentina**

En el año 2004 se sanciona la Ley Nacional N° 25916 (Congreso de la Nación de la República Argentina, 2004), la cual busca promover la valorización de los residuos domiciliarios, entendiéndose como tal, el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan perjudicar al medio ambiente, a través de la implementación de métodos y procesos adecuados, disminuyendo los residuos con destino a disposición final y minimizando los impactos negativos que estos residuos puedan producir sobre el ambiente. Desde la promulgación de dicha ley, en Argentina se dio comienzo a distintas iniciativas provinciales y municipales para cumplir con los objetivos propuestos (Cavallin, et al., 2016).

Como indica la mencionada ley, la gestión de los **RSU** es de competencia municipal. Es importante destacar que el sistema municipal argentino se caracteriza por ser heterogéneo, en el sentido de que existen múltiples tipos de municipios con diferentes atribuciones y responsabilidades, según lo establezca cada una de las constituciones y leyes orgánicas provinciales. La determinación del régimen municipal constituye una facultad reservada a las provincias y no delegada al gobierno federal, por lo que coexisten veinticuatro regímenes distintos (uno por cada una de las provincias y uno por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires) que definen la tipología y el grado de autonomía de maneras diversas. A partir de la incorporación del artículo 123 en la Constitución Nacional en 1994, se consagró la autonomía municipal, lo que resultó en un aumento de responsabilidades y los municipios se convirtieron en los primeros receptores gubernamentales de las múltiples demandas de la sociedad civil que antes se dirigían a otros niveles de gobierno, por lo que el impacto de sus intervenciones adquirió un lugar central en el alcance de la calidad de vida de la población (Schejtman & Irurita, 2012). Sin embargo, la delegación formal de funciones no siempre fue acompañada por la transferencia de recursos materiales, económicos y técnicos necesarios para desempeñarlas, por lo que, la capacidad real de los municipios resulta muchas veces limitada, tanto por debilidades internas como por los “cuellos de botella” generados por el creciente nivel de demandas que generó en las poblaciones frente a las posibilidades reales de implementar políticas.

Teniendo en cuenta lo mencionado, cada ciudad comenzó por realizar las mejoras necesarias según el estado en el que se encontraba su respectivo sistema de **GRSU** (Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), 2014). Actividades como erradicación de **BCA**, construcción de rellenos sanitarios, disposición de contenedores para recolectar materiales reciclables, desarrollo de sistemas de recolección diferenciada de **RSU**, instalación de plantas de acopio y/o tratamiento de **RSU**, entre otras. De esta forma, los cambios y avances en algunos municipios fueron notables, mientras que en otros se mantiene la falta de un tratamiento integral de los **RSU** e incluso, la utilización de **BCA** como método de disposición final, son una de las principales consecuencias de una gestión inadecuada, ineficiente e insuficiente de los **RSU**. Asimismo, la gran mayoría de los gobiernos locales argentinos dependen de los programas y subsidios para la **GRSU** de los niveles provincial y nacional. En muy pocos casos, los recursos propios superan el 30% del total de gastos relacionados a la **GRSU**. Esto evidencia un escenario que

presenta no solo escasez de recursos sino, además, capacidades insuficientes para generarlos y enfrentar las problemáticas propias de manera autónoma. Al margen de sus particularidades, los municipios argentinos presentan ciertas características comunes que se enumeran a continuación (Schejtman & Cellucci, 2014):

- **BCA** sin control ni técnicas de saneamiento, rellenos sanitarios insuficientes o próximos a agotarse, escasas y aisladas iniciativas de recuperación y reciclado de **RSU**, y falta de recursos financieros. Salvo excepciones, la mayoría de los municipios posee partidas insuficientes para el manejo de los **RSU**. En general, las erogaciones derivadas del manejo de los **RSU** representan un elevado porcentaje del presupuesto total municipal, incluso cuando implique solamente la recolección y la disposición final en un **BCA**. Según Solda (2010), la **GRSU** le insume a un municipio, en promedio, entre un 15 % y un 30 % del presupuesto municipal.
- Carencia y desarticulación normativa, falta de coordinación interjurisdiccional y escasez de conocimientos específicos y personal capacitado.
- Modelos de gestión diseñados como recetas aplicables a cualquier contexto, que no tienen en cuenta los retos reales que presenta la gestión de **RSU**.
- Falta de un abordaje integral que comprenda el ciclo completo, a saber: la generación, la recolección, el tratamiento, la disposición final, y también la reinserción en el mercado de los materiales recuperados.
- Desconocimiento de información básica y necesaria para mejorar la gestión de los residuos. En muchos casos, se carece de datos fundamentales para la toma de decisiones informadas, como la cantidad de residuos generados, las áreas del municipio en donde se generan más o menos residuos, los tipos que se producen según la zona, el costo de la disposición de cada kilo generado, las características geofísicas del terreno para la disposición final, la existencia de recuperadores urbanos formales o informales y el presupuesto del área, entre otros.
- Falta de incentivos y herramientas que guíen a los gobiernos locales en la búsqueda de soluciones para los residuos acordes a sus características particulares. Cada municipio tiene la competencia de establecer la modalidad de manejo de los residuos en su territorio, y si bien existe un marco normativo a nivel nacional, solo establece líneas generales que funcionan como un horizonte deseado pero que no provee mecanismos para complementar y acompañar a los que no poseen

capacidad técnica o financiera para adoptar pautas sustentables. Así, cada uno se ocupa de los RSU de manera individual, sin información, apoyo económico o técnico sostenido o ningún tipo de mecanismo que promueva la coordinación interjurisdiccional y permita escalar los costos de su manejo.

- Dentro de la estructura municipal, en general, existen áreas específicas destinadas a la gestión ambiental y dentro de estas a la GRSU, pero también se registran muchos casos donde la GRSU se encuentra dentro de las funciones de áreas de servicios públicos o higiene urbana, por lo que podría deducirse que todavía prevalece una mirada lineal y no integral del manejo de los RSU.
- Falta de sinergia para el desarrollo, actualización y mejora de las ordenanzas y normativa que apoyen y enmarquen los programas de manejo de residuos y la adopción de pautas de manejo sustentables.
- Para aquellos municipios que impulsan alternativas de gestión de RSU implementando sistemas integrales, promoviendo la separación en origen, la recolección diferenciada y el tratamiento de los residuos a través de plantas de clasificación, la situación regional no acompaña demasiado ya que los potenciales mercados en los que sería posible incorporar los materiales recuperados están en su mayoría cerca de las áreas metropolitanas de las grandes ciudades o de los puertos (exportación), y la gran extensión territorial del país redundante en que los costos de transportar los residuos reciclables hacia los puntos de venta sea considerablemente mayor a las ganancias que la venta de los materiales podrían representar.

#### **1.5.4.1 Generación de RSU**

Según la séptima edición del informe “Sistemas de indicadores de desarrollo sostenible” de Argentina, en el 2012 se ha llegado a generar en promedio 1 kilogramo de RSU por habitante por día. En la Tabla 7 siguiente, se desagrega la composición de los RSU promedio de Argentina.

Tabla 7. Componentes en peso de los RSU en Argentina. Fuente: elaboración de la DNGIR. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación en base a datos provistos por el Censo 2010.

<b>RSU Argentina - Componentes % Peso</b>	
<b>Papeles y cartones</b>	13,770%
Diarios y revistas	2,150%
Papel de oficina (alta calidad)	0,670%
Papel mezclado	6,170%
Cartón	3,970%
<b>Envases tetrabrick</b>	0,860%
<b>Plásticos</b>	14,580%
PET (1)	2,280%
PEAD (2)	1,760%
PVC (3)	0,570%
PEBD (4)	5,770%
PP (5)	2,490%
PS (6)	1,450%
Otros (7)	0,270%
<b>Vidrio</b>	3,110%
Verde	1,550%
Ámbar	0,390%
Blanco	1,120%
Plano	0,040%
<b>Metales ferrosos</b>	1,430%
<b>Metales no ferrosos</b>	0,410%
<b>Metales</b>	1,840%
<b>Materiales textiles</b>	4,540%
<b>Madera</b>	1,130%
<b>Goma, cuero, corcho</b>	1,260%
<b>Pañales descartables y apósitos</b>	5,730%
<b>Materiales de construcción demolición</b>	2,120%
<b>Residuos de poda y jardín</b>	10,010%
<b>Residuos peligrosos</b>	0,040%
<b>Residuos patógenos</b>	0,020%
<b>Residuos peligrosos y patológicos</b>	0,220%
Medicamentos	0,001%
<b>Desechos alimenticios</b>	38,830%
<b>Misceláneos menores a 25,4 mm</b>	2,620%
<b>Aerosoles</b>	0,170%
<b>Pilas</b>	0,001%
<b>Material electrónico</b>	0,020%
<b>Otros</b>	0,040%
<b>Peso volumétrico</b>	0,304%

#### **1.5.4.2. Recolección y transporte de RSU**

Una encuesta realizada por CIPPEC (Schejtman & Irurita, 2012) muestra que en la mayoría de los municipios medianos y pequeños, la recolección formal de los residuos se realiza a través de servicios municipales o por medio de la contratación de empresas especializadas o cooperativas locales. En cambio, en las ciudades grandes o capitales, se suele recurrir al sector privado o mixto. En muchos casos, el municipio realiza la recolección en parte del territorio para utilizarlo como medida de contralor y para que, ante contingencias, pueda cubrir emergencias aunque sea parcialmente. Datos del informe “Mapas críticos de gestión de residuos” (DNGL, 2016) revelan que el porcentaje de cobertura de recolección de RSU por provincia ha mejorado en los últimos años, superando el 80% promedio, mientras que el porcentaje de disposición adecuada en relleno sanitarios, a nivel país, alcanza el 61% de habitantes, identificando a provincias como Neuquén, San Juan, Tucumán, Misiones y Gran Buenos Aires con porcentajes superiores al 80%, mientras que en otros casos se registran números inferiores al 20%. En la provincia de Buenos Aires, foco central del presente trabajo, alrededor de un 85% de los municipios poseen una disposición final adecuada de RSU.

#### **1.5.4.3. Disposición Final**

En términos generales, en la mayoría de los municipios más pequeños, la disposición final se realiza con escasos controles ambientales y el consiguiente riesgo para el ambiente y la salud que esta situación supone (ver Figura 14). Específicamente, en hasta 50.000 habitantes predominan los BCA.

No existe una amplia tendencia a la regionalización de la disposición final, es decir, a desarrollar rellenos sanitarios entre varios municipios. Los únicos casos en los cuales se detectan o existen planes para implementarla, son también los grandes conglomerados urbanos de la Argentina (Gran Buenos Aires, Gran Córdoba, Gran La Plata, Gran Rosario, Gran Tucumán y Gran Santa Fe) y ciudades importantes como Bahía Blanca, que recibe en su relleno sanitario los residuos de ciudades pequeñas cercanas. Existen diferentes factores que explican esta baja. En primer lugar, el extenso territorio que ocupa la Argentina y la gran dispersión geográfica que poseen los municipios entre sí, que torna excesivamente costoso o impracticable el impulsar iniciativas conjuntas. En segundo lugar, la falta de información básica acerca de costos y presupuesto, que se mencionó anteriormente, impide realizar estimaciones sobre potenciales ahorros y posibilidades de

inversión. En tercer lugar, y en particular en lo que respecta a la disposición final, la resistencia de las poblaciones a ocupar territorios cercanos a sus domicilios para la creación de un relleno sanitario (lo que se denomina efecto NIMBY según sus siglas en inglés “not in my back yard” o “no en mi patio trasero”), por lo que es muy difícil llegar a acuerdos sobre su localización. Por último, existen limitantes políticas que impiden acuerdos intermunicipales, derivadas de la disímil pertenencia partidaria de sus líderes.

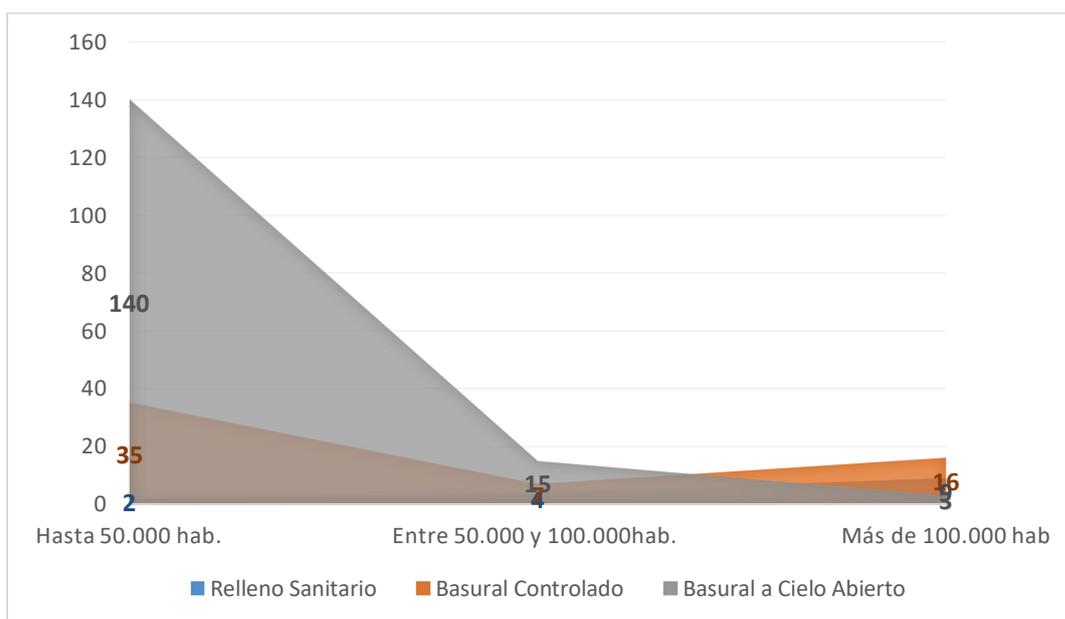


Figura 14. Cantidad de RSU por tipo de disposición final de residuos según el rango poblacional en Argentina. Fuente: (Schejtman & Irurita, 2012)

#### **1.5.4.4. Estrategias de GIRSU**

En cuanto a iniciativas de tratamiento de RSU en el país, en promedio se registra que un 37% de la población tiene alcance a las mismas, y en la provincia de Buenos Aires un 76% (DNGI, 2016). La mencionada encuesta del CIPPEC, muestra iniciativas de separación de residuos en el 85 % de los municipios. Un ejemplo es el caso de CABA y RMB (Universidad Nacional de San Martín - AMBA, 2015). A partir de la saturación de los rellenos sanitarios gestionados por el CEAMSE (Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado), a través de distintas iniciativas, a partir de 2012 algunos municipios comenzaron a registrar una disminución en la disposición final en rellenos sanitarios. Por ejemplo, los municipios de Brandsen, La Plata, Marcos Paz, Morón y San Miguel tienen programas de recolección diferenciada domiciliar que, a inicios de 2014, cubren todo el casco urbano, mientras que Malvinas Argentinas y San Isidro cuentan con contenedores para la recolección de materiales reciclables en todo el

partido. En tanto, la mayoría de los otros municipios realiza alguna práctica de recolección diferenciada sectorizada, otros municipios no realizan ninguna, y la CABA está ejecutando un plan gradual de recolección diferenciada en todo el territorio mediante contenedores. En base a los datos que pudieron obtenerse para 2014, se observa que, aun en los distritos donde la recolección diferenciada está más extendida, el índice de recuperación de materiales es bajo. Se destaca La Plata por haber alcanzado un índice de recuperación del 20%, seguida por la ciudad de Buenos Aires (6%), Morón (4%) y Brandsen (3%). En la mayoría de los distritos existen o están en construcción distintos tipos de plantas de clasificación manual de residuos secos reciclables, varias de ellas operadas por recuperadores urbanos.

## **CAPÍTULO II**

# **CONCEPTUALIZACIÓN DE UN MODELO EFICIENTE DE GIRSU**



## 2.1. Decisiones en pos de una GIRSU eficiente

La gestión de los desechos es competencia municipal pero las limitaciones financieras, la falta de capacitación técnica y profesional, las discontinuidades políticas y administrativas, la presión social y la falta de control ambiental, hacen que no sea una tarea fácil. Existen numerosos planes de GIRSU, sin embargo, cada ciudad tiene sus particularidades y el conocimiento del estado actual y las características propias del lugar, se presentan como el principal factor a tener en cuenta. El diagnóstico de la situación solo puede realizarse relevando los datos e informaciones relacionadas, como generación y caracterización de los RSU, dimensionamiento del problema y los recursos humanos, materiales y financieros que se disponen o se podrán disponer (CEMPRE, 2010).

Posterior al diagnóstico debe iniciarse el diseño de los planes de acción necesarios para implantar una GIRSU. La planificación es una parte esencial para asegurar que cualquier proceso complejo trabaje adecuadamente, sea sostenible en el tiempo y de soluciones eficaces y eficientes, es decir, utilicen de la mejor manera los recursos disponibles y logren sus objetivos en el menor tiempo posible. En consecuencia, las alternativas de planificación deberán tener en cuenta los siguientes ítems (AIDIS, 2005):

- Criterio económico-financiero, para definir razonablemente, costos mínimos, inversiones, tasas de retorno, costo/beneficio, viabilidad financiera, tarifa del servicio, entre otras (Fundación Forum Ambiental, 2017).
- Criterio ambiental, para asegurar que en todas las soluciones adoptadas los recursos naturales (agua, tierra, aire, flora y fauna) del municipio y de la región, están siendo preservados y protegidos (Al-Khatib, et al., 2007).
- Criterio social, para establecer índices de los efectos producidos en la salud, seguridad, educación, generación de empleo, asistencia social, entre otras, que la alternativa elegida pueda causar (Martimportugués Goyenechea, et al., 2008).
- Criterio político-gerencial, para optimizar modelos alternativos de cooperación, sociedades, y acuerdos necesarios para la alternativa propuesta, asegurando la buena convivencia y el apoyo de las entidades municipales, provinciales, nacionales y privadas, así como de la comunidad influenciada.

Es muy importante saber que en cada decisión tomada se debe tener en claro cuál es la meta que se quiere y se debe alcanzar. En este sentido, las metas podrán ser de largo, mediano o corto plazo, definidas a más de 5 años, entre 1 y 5 o menores a 1 año respectivamente. Asimismo, cabe destacar que ciertas alternativas o decisiones por parte de los gestores no podrán ser encaminadas si otras decisiones no son tomadas previamente. En función de ello, se diferencian la gestión estratégica, táctica y operativa

de RSU, las cuales se describen brevemente en la Figura 15. Asimismo, puede observarse como el contexto nacional e internacional, los intereses sociales e industriales y las tecnologías existentes, pueden influir a la hora de tomar decisiones en todos los niveles de gestión.

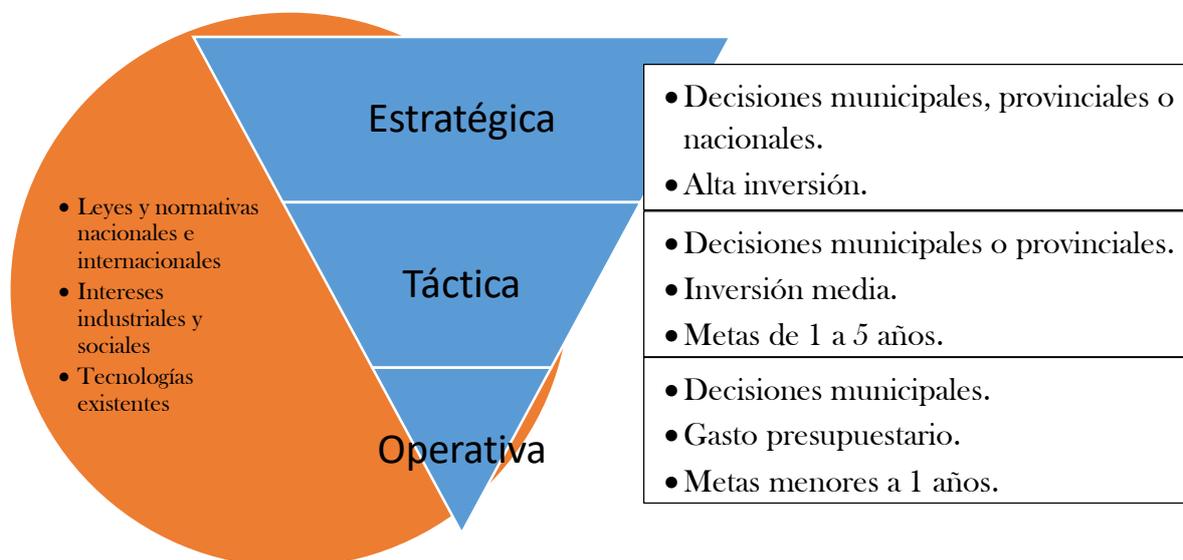


Figura 15. Niveles y alcances de la GRSU: Gestión estratégica, táctica y operativa

### 2.1.1. Gestión Estratégica de RSU

La Gestión Estratégica de RSU (GERSU) es el proceso de toma de decisiones en base a los objetivos del plan de GRSU a implementar, cuyas metas se esperan cumplir y/o tendrán influencia en el largo plazo. Se trata de decisiones principalmente de nivel nacional o provincial que, acompañada de una alta inversión monetaria, darán el pie, incentivo o la obligación a los municipios para aplicar las cuestiones más directas sobre sus planes de GRSU. Por ejemplo, gestionar leyes que promuevan la valorización de los residuos, instituir la responsabilidad extendida del sector productivo, generar fuentes de financiamiento para centros adecuados de disposición final, plantas de tratamiento, camiones, equipos, instalaciones, etc. A nivel municipal también se da la GERSU en el sentido que los municipios deben decidir cuestiones de responsabilidades operativas y legales, contratos, logística inversa, concientización social, entre otras (ver Tabla 8).

Otro factor importante a nivel de la GERSU es la definición de mecanismos de seguimiento, control y evaluación de las acciones a desarrollar de forma de buscar la mejora continua del sistema, así como para producir estadísticas y pronósticos confiables para la toma de futuras decisiones.

### **2.1.2. Gestión Táctica de RSU**

La Gestión Táctica de RSU (GTRSU) es el proceso de toma de decisiones en base a las decisiones definidas en el nivel de la GERSU, cuyas metas se esperan cumplir y/o tendrán influencia en el mediano plazo. Se trata de decisiones principalmente de nivel provincial y municipal. Dado que la presente Tesis Doctoral sólo se enfocará cuestiones ligadas a la GTRSU, la misma será detallada en la sección 2.2.

### **2.1.3. Gestión Operativa de RSU**

La Gestión Operativa de RSU (GORSU) es el proceso de toma de decisiones a partir de las decisiones tomadas previamente en el nivel de la GTRSU, cuyas metas se estipulan cumplir en el corto plazo, así como su influencia y alcance repercuten principalmente en el día a día de la gestión. Las decisiones se centran en los municipios, y están muy limitadas por el presupuesto y los recursos disponibles. Cuestiones como contratación de recolectores y camioneros, distribución de turnos, ejecución de campañas de concientización, ubicación de contenedores de residuos, entre otras (ver Tabla 8).

### **2.1.4. Guía de preguntas para las distintas gestiones**

A modo de descripción y guía sintética de las decisiones principales a resolver en cada nivel de la gestión, se presenta la Tabla 8 identificando las posibles y potenciales respuestas a cada una de las preguntas claves establecidas. Cabe destacar que los ítems no se presentan como soluciones excluyentes entre sí, sino que pueden combinarse entre ellas.

## **2.2. Gestión táctica de RSU**

La Gestión Táctica de RSU (GTRSU) es el proceso de toma de decisiones en base a las decisiones definidas en el nivel de la GERSU, cuyas metas se esperan cumplir y/o tendrán influencia en el mediano plazo. Se trata de decisiones principalmente de nivel provincial y municipal.

Tabla 8. Decisiones requeridas en cada uno de los niveles de la GIRSU

Gestión	Decisiones	Posibles respuestas
<b>Estratégica</b>	¿Qué sistema de gestión de RSU se pretende?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Básico, que no valore los RSU.</li> <li>• Intermedio, que valore una parte de los RSU</li> <li>• Integral, que valore y minimice los RSU</li> </ul>
	¿Cuál será el método de disposición final?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basurales</li> <li>• Rellenos Sanitarios</li> <li>• Incineración</li> </ul>
	¿Cuál será la forma de valorizar los RSU?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta de acopio de RSU reciclables</li> <li>• Planta de reciclaje</li> <li>• Planta de compostaje</li> <li>• Incineración con generación de energía</li> <li>• Planta de Biogas</li> </ul>
	¿Cuál será el sistema de logística inversa?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema recolecta los RSU diferenciados</li> <li>• El ciudadano es el encargado de llevar los RSU para el reciclaje</li> </ul>
	¿Quién/es serán los dueños de los sistemas?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tercerización del sistema de recolección, de disposición final, de reciclaje, etc.</li> <li>• Gestión del estado</li> </ul>
	¿Qué se espera de la población e industrias afectadas?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participación</li> <li>• Indiferencia</li> <li>• Compromiso</li> <li>• Obligación</li> </ul>
<b>Táctica</b>	¿Cómo será la recolección de los RSU?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puerta a puerta</li> <li>• Por contenedores</li> <li>• Por contenedores diferenciados</li> <li>• Por tachos domiciliarios</li> <li>• Por bolsas de colores</li> <li>• Estaciones de transferencia</li> </ul>
	¿Cuál será la frecuencia de recolección de los RSU?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Diferenciada por tipo de RSU</li> </ul>
	¿Cuál es la dotación de personal necesario?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad y calificación de personas para recolección, limpieza, administración, etc.</li> </ul>
	¿Cómo será el método de concientización de la población?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campañas por medios de comunicación</li> <li>• Campañas presenciales en escuelas, empresas, barrios etc.</li> <li>• Multas</li> <li>• Premios</li> </ul>
<b>Operativa</b>	Respecto a la logística de recolección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación de contenedores</li> <li>• Distribución de bolsas de colores</li> </ul>
	Respecto al personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacitación</li> <li>• Distribución de turnos</li> <li>• Forma de pago</li> </ul>
	Respecto a la concientización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definición de las campañas de concientización</li> <li>• Definición de los sistemas de motivación o multas.</li> </ul>

### 2.2.1. Recolección y transporte

La recolección de RSU abarca desde la colecta de los desechos de los ciudadanos hasta su transporte hasta el lugar de disposición final. La recolección variará según las características de las instalaciones, actividades o localizaciones donde se generan los

residuos y los métodos utilizados para el almacenamiento in situ de los residuos acumulados entre recolecciones. Asimismo, la recolección presenta una gran complejidad logística, ya que la generación de los residuos se produce en cada casa, en cada bloque de viviendas, en cada instalación comercial e industrial, así como en las calles, en los parques, e incluso en zonas vacías. La determinación del tipo de recolección es tal vez el factor más determinante y de mayor criticidad para los gestores de RSU, dado el alto impacto en los costos presupuestarios, la inversión necesaria y la influencia en la eficacia del sistema. La principal distinción de métodos de recolección está relacionada con si hay o no separación de RSU en origen. En los últimos años, los países más avanzados investigan e implementan nuevos programas de recolección con el objetivo de lograr mayor selectividad de los materiales, así como mayor participación de la comunidad generadora de residuos. La recolección selectiva que alcanza mayores niveles de separación y reutilización conlleva a mayores niveles de recuperación y reciclado de materiales, incluyendo el compostaje, y menores costos de disposición final.

#### **2.2.1.1. Sistemas de recolección no diferenciada**

Consiste en recolectar el total de los desechos de los ciudadanos sin que exista ninguna separación entre los residuos que pueden reutilizarse o reciclarse. Cada vivienda, deposita sus desechos, generalmente en bolsas, en canastos domiciliarios ubicados en las veredas o en contenedores esparcidos por las calles o veredas. En este sentido, los sistemas encontrados en ciudades Argentinas de recolección no diferenciada se clasifican en dos grupos: recolección puerta a puerta o recolección por contenedores. Generalmente la recolección puerta a puerta se da en barrios, con viviendas de baja o mediana altura. Se compone de un camión, que puede ser compactador, un conductor, y de 1 a 3 personas encargadas de coleccionar manualmente las bolsas de basura de los cestos domiciliarios ubicados en las veredas. Según la tasa de generación y la frecuencia establecida, el camión realiza siempre el mismo recorrido prefijado, desde la central donde se estacionan los camiones, por los barrios o calles asignadas y hacia una estación de transferencia o directamente hacia el lugar de disposición final (basural, vertedero semicontrolado o relleno sanitario). En estos lugares, puede darse la separación y recuperación de los residuos reciclables, ya sea por trabajadores formales en instalaciones preparadas, o por trabajadores informales bajo condiciones precarias de seguridad e higiene. En otros países se utilizan tachos domiciliarios en vez de bolsas, es decir, el generador o el

operador vacía los tachos de cada vivienda en el camión y luego lo devuelven al ciudadano.

El sistema de recolección por contenedores se utiliza generalmente en bloques de viviendas elevados, barrios cerrados, o en sectores de la ciudad con calles muy estrechas o congestionadas. En estos casos, el generador debe depositar su bolsa de desecho dentro del contenedor más cercano, los cuales, según el tamaño y tipo del contenedor utilizado, se pueden vaciar mecánicamente utilizando vehículos de recolección equipados con mecanismos de descarga, o los contenedores cargados pueden ser transportados a otro lugar, donde se descargan los contenidos. Este método podría requerir menos trabajadores por camión que el método puerta a puerta, pero si las tecnologías de carga de los camiones no son lo suficientemente automáticas, entonces también se requieren 2 o 3 personas para vaciar cada contenedor.

El sistema de recolección de RSU no diferenciada presenta para los municipios un menor costo logístico de gestión y planificación, así como una menor inversión en equipamientos y camiones especiales. Es el sistema, aparentemente, más simple, tanto para la comodidad de los generadores como para el diseño de los gestores. Sin embargo, claramente no se tienen en cuenta los costos ocultos existentes dados por los efectos adversos de esa comodidad sobre la salud de las personas y la sustentabilidad del medio ambiente. Es el sistema característico de las ciudades latinoamericanas. Afortunadamente, en los últimos años, la tendencia está cambiando y se registran cada vez más municipios con iniciativas e implementaciones de recolección diferenciada.

#### **2.2.1.2. Sistemas de recolección diferenciada**

En un sistema de recolección diferenciada se espera un compromiso por parte de los ciudadanos en separar en origen sus desechos. Dicha separación puede ser muy variada y va a depender de las posibilidades de tratamiento posteriores, y van desde la binaria segregación entre Seco (reciclables) y Húmedo (no reciclables), hasta la separación estricta en papel, cartón, vidrio, aluminio, orgánico, resto, entre otras. Además de plantas de acopio y tratamiento de los RSU reciclables, se requiere de una fuerte y continua concientización de la población para hacer eficiente y sostenible el sistema.

Al igual que anteriormente, pueden diferenciarse dos grandes grupos: recolección puerta a puerta y por contenedores. En el primero, la diferenciación de la colecta de los residuos segregados puede darse: variando el color de las bolsas que cada ciudadano deposita en

su cesto domiciliario; definiendo los días para cada una de las fracciones; o una combinación de ambas. Un ejemplo de dicho sistema es la ciudad de La Plata, (Buenos Aires, Argentina) donde se utiliza una bolsa verde para los RSU inorgánicos (papel, cartón, plásticos, vidrios, metales, tetrabik, gomas, telgopor, madera y tela, limpios y secos) y una bolsa de cualquier otro color para los orgánicos (restos de comida, café, yerba y te). Asimismo, la bolsa verde se debe sacar a la calle en determinados días y horarios, en función de localización dentro de la ciudad.

Si se utiliza un sistema por contenedores, deben ubicarse los mismos correctamente diferenciados de forma que los ciudadanos puedan depositar sus residuos separados en los mismos. Asimismo, se requiere de camiones y equipamientos especiales para vaciar y limpiar cada contenedor. Este es el sistema que predomina en las ciudades de Cataluña, España, el cual se explicará en el Capítulo III.

#### **2.2.1.3. Sistema de recolección mixta**

El sistema de recolección mixta es una modalidad intermedia entre los sistemas mencionados previamente. Consiste en ubicar contenedores para residuos reciclables en determinados lugares claves de la ciudad (densamente poblados o concurridos) para que el ciudadano lleve y deposite sus residuos separados en origen a dichos contenedores, mientras que los no reciclables se recolectan puerta a puerta. En este caso, solo existirá la segregación en origen y la correspondiente recuperación de materiales en aquellas viviendas interesadas y concientizadas en la causa, mientras que, en los demás casos, la recolección será no diferenciada, dejando toda la masa de basura en la misma bolsa o contenedor.

Este es el caso de muchas ciudades que quieren comenzar con alguna iniciativa de recuperación de materiales, para migrar de un sistema de recolección de RSU no diferenciado a uno diferenciado. Por ejemplo, en la ciudad de Bahía Blanca, (Buenos Aires, Argentina) bajo el nombre de “Puntos Limpios” se determinaron 7 puntos en la ciudad donde se ubican 4 contenedores para las fracciones de papel, plástico, vidrio y aluminio (Ver Figura 16). Sin embargo la recolección oficial sigue siendo puerta a puerta y no diferenciada.

Por otro lado, también puede darse la recuperación de materiales reciclables con una recolección puntual en establecimientos generadores de grandes volúmenes de los mismos como son restaurantes (vidrio y plástico), instituciones educativas (papel y

cartón), supermercados (plásticos y cartón), entre otros. En este caso, se destinan contenedores, camión y una ruta especial para la recolección.



Figura 16. Contenedores diferenciados de RSU localizados en los denominados “Puntos Limpios” de la ciudad de Bahía Blanca.

### 2.2.2. Frecuencia de recolección

La frecuencia de recolección de RSU consiste en definir los días, la cantidad de veces por día y por semana que cada tipo de RSU será recolectado en cada punto, ruta o sector de la ciudad. Por ejemplo, en los barrios residenciales la recolección puede hacerse de lunes a sábados 1 vez por día, mientras que en el área céntrica de la ciudad se determina 2 veces por día, de lunes a lunes, más una recolección especial sobre los comercios generadores de grandes volúmenes de RSU. Dichas diferencias surgen de analizar la tasa de RSU generados versus el máximo número de días que pueden acumularse los RSU en los contenedores o cestos domiciliarios. Si esta decisión no se toma adecuadamente, resultará en una gran acumulación de residuos en algunos días y poca en otros, lo cual, además de generar descontento en la población, incrementará los costos logísticos debido a la necesidad de mayor cantidad de recursos (Ghiani, et al., 2014). Asimismo, si existiera un sistema de recolección de RSU diferenciados, debe tenerse en cuenta que la fracción húmeda tendrá un periodo permitido de acumulación (o no recolección) menor que la fracción seca, debido a cuestiones de rápida biodegradación, generación de olores y lixiviados y aparición de moscas y roedores, entre otras. Un completo estudio y determinación de la frecuencia ideal para cada sistema de recolección influirá de manera

favorable en el establecimiento de la cantidad de recursos necesarios como camiones recolectores y mano de obra directa necesaria, minimizando la inversión y los costos mensuales implicados.

### **2.2.3. Disponibilidad de personal**

Otro aspecto de gran importancia dentro de la gestión táctica de RSU es la gestión del personal involucrado en el sistema. Ya sea que se trate de una gestión pública o privada, puede dividirse a los trabajadores en Mano de Obra Directa (MOD) y Mano de Obra Indirecta (MOI). La MOD incluye a las personas que participan en la actividad de la recolección de los RSU: quien maneja el camión y quien/es colectan las bolsas de basura manualmente o manipulan la descarga de los contenedores. Es por esto (y como se demostrará en los capítulos posteriores) que la MOD necesaria está relacionada con la cantidad y capacidad de los camiones utilizados, definiendo por ejemplo, 3 personas por camión por ruta/turno. Por su parte, la MOI incluye al personal administrativo relacionado con la GRSU. La cantidad de personas puede variar mucho entre municipios de iguales características debido principalmente a la forma de organización o dependencia que puede tener dicha gestión. Es decir, en algunas ciudades existe el área de gestión de RSU con determinada cantidad de personas abocadas a dichas tareas, mientras que en otros municipios, la gestión de RSU se realiza en la Secretaría de Medio Ambiente, donde en teoría puede haber muchas personas implicadas, pero que en la práctica no sea así porque involucra otras actividades como tratamiento de efluentes, contaminación del aire, etc.

Algo para destacar del personal dentro del sistema de GRSU es la fuerte presencia y estructura sindical que poseen en la mayoría de los municipios estudiados. Justificado en la protección de los derechos de los trabajadores y en la búsqueda de mejores condiciones laborales, el sindicato muchas veces resulta en una instancia más de trabajo y negociación para la mejora del sistema de GRSU.

### **2.2.4. Motivación de la población**

Como se mencionó previamente, la población es un factor muy importante en el éxito de la GRSU. No sólo por la participación y compromiso que se requiere de los ciudadanos en el día a día, por ejemplo, segregando los RSU reciclables y acondicionándolos adecuadamente; sino también por la concientización de la gravedad de la problemática y por la necesidad de un cambio de paradigma que resulte en una gestión eficiente y

sostenible en el tiempo. Hay que destacar que cada individuo es un generador de residuos en potencial y puede, a partir de su local de generación - domicilio, trabajo, escuela, ocio y otros- incorporar prácticas que lo lleven a minimizar dicha generación, procurando incluso, incorporar cambios en los padrones no sostenibles de producción y consumo.

Dentro de la gestión táctica de RSU se apunta a la definición del método de motivación y concientización a utilizar en el mediano plazo, de forma que el sistema funcione, pero sin exceder ni caer en gastos de marketing verde o planes que no lleguen nítidamente a la población. Asimismo, debe decidirse si se utilizará un sistema de premios o castigos para motivar u obligar a la correcta participación de las personas. Por ejemplo, descuentos en las tasas de recolección de residuos a aquellas empresas, comercios, bares, restaurantes, hoteles, etc. que participen y colaboren en los programas de recolección selectiva y, por otro lado, tasas mayores para la gestión de determinados residuos como objetos voluminosos y electrodomésticos, tanto de línea blanca como marrón, ya que su adecuada gestión como residuos resulta cada vez más cara y compleja. Asimismo, esto sirve para que el ciudadano/consumidor tome consciencia, en el momento de adquirir el artículo, de que cuando éste se convierte en residuo surge un problema de eliminación que la sociedad debe gestionar y costear.

La motivación social presupone que la sociedad esté informada y sensibilizada para participar de las decisiones y políticas públicas. Esto requiere la implementación de canales que permitan la efectiva intervención de la sociedad, desarrollo de programas de educación y acceso a informaciones fidedignas y transparentes. Definir un sistema de multas para aquellos ciudadanos que no cumplan con el comportamiento establecido requiere de una política pública que evalúe, acompañe y controle continuamente el sistema. Las decisiones se basan en construir mecanismos, instrumentos e instancias que garanticen el control social sobre la GIRSU.

En lo que concierne a los mecanismos de cobro de servicios de recolección, es preciso que se instituya un sistema de evaluación efectiva de costos para establecer tasas socialmente justas. Para que haya aceptación por parte de la población, es imprescindible sensibilizar a la opinión pública sobre la importancia del pago por los servicios prestados. De la misma forma, es importante que el poder público asuma el compromiso de aplicar mecanismos de cobro para hacer efectiva la GIRSU y por consiguiente garantizar la

calidad de los servicios. Por lo que es fundamental elaborar programas de reaprovechamiento de RSU compatibles con las reales posibilidades de pago de la población, a fin de asegurar la sostenibilidad y la continuidad del sistema.

Otra cuestión clave es analizar la posibilidad de integración de los recolectores informales de RSU al sistema de gestión integral. En este sentido, en el mediano plazo se deben considerar los factores como el cierre de basurales a cielo abierto, con el objetivo de crear condiciones dignas de trabajo para los recolectores que allí trabajen, así como la integración de los mismos a los sistemas de recolección selectiva, separación y tratamiento de los materiales reciclables, ofreciendo instalaciones, capacitación y condiciones laborales apropiadas.

### **2.3. Indicadores para la GIRSU**

De la mano con el desarrollo de iniciativas sustentables en torno a la GIRSU deben llevarse a cabo planes de evaluación y medición de su situación y progreso, con el objetivo de tener conocimiento de su real desempeño, sus puntos débiles y fuertes y, además, necesario como base para la toma de decisiones de corto, mediano y largo plazo. En este sentido, en los últimos años, se han desarrollado numerosos indicadores de sostenibilidad ambiental o sustentabilidad que reúnen un conjunto de parámetros para obtener información específica de algún proceso o función que actúe en la relación sociedad-ambiente (Puma-Chávez et al., 2011). El objetivo de dichos indicadores es proveer una base empírica y numérica para conocer las problemáticas ambientales, calcular el impacto de las actividades de los seres humanos en su entorno y evaluar el desempeño de las políticas públicas, ayudando a los tomadores de decisiones y a la sociedad a definir metas en pos del desarrollo sustentable (Rodríguez Solórzano, 2002). Específicamente, en el área de la GIRSU, los indicadores surgen con el propósito de obtener un seguimiento y control del funcionamiento del sistema en pos de mejorar la calidad del servicio que proporcionan los organismos, públicos o privados, que lo gestionan

En un contexto de escasez de recursos presupuestarios y técnicos, y de aumento creciente de la producción de residuos; la GIRSU es uno de los principales desafíos de política pública tanto para los pequeños municipios como para los grandes, en busca de desarrollar estrategias eficaces y económicamente sustentables (Schejtman & Cellucci, 2014). Como se mencionó anteriormente, para poder avalar y sostener dichas estrategias

es necesario la definición y medición de indicadores. Si bien dicha acción implica gastos monetarios, de tiempo y de personal es clave considerarlos como una inversión en vez de un gasto. No sólo el aumento de la generación de RSU es insostenible por los recursos presupuestarios limitados, sino también, porque lo son las disponibilidades y capacidades físico-químicas del territorio destinado a basurales o rellenos sanitarios. Los resultados de los indicadores sirven para identificar falencias en el sistema y su consecuente solución para mejorar la eficiencia del mismo. Asimismo, son esenciales para tomar conciencia del impacto que generan sobre la salud y el ambiente las prácticas y manejos inadecuados de los RSU, buscando sensibilizar a la población y advirtiendo a los gobernantes sobre las ventajas de la reducción y recuperación de los residuos (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005). De esta forma, se podrá dar comienzo a un cambio de paradigma que conduzca al desarrollo sustentable de la ciudad.

Por otro lado, la consideración de indicadores para la GIRSU es importante para comparar el desempeño de diferentes municipios, identificando aquellas gestiones de vanguardia y modelos a seguir, según las características y condiciones de cada uno. A su vez, permiten anticipar situaciones de peligro como contaminación de napas, ríos y para demostrar relaciones de dependencia entre variables.

Un indicador en la GIRSU surge de combinar parámetros simples, como por ejemplo frecuencia de recolección, número de vehículos de flota recolectora o número de viajes a disposición final, de forma que el resultado de la combinación contribuya a analizar aspectos de la gestión tales como calidad del servicio prestado, eficiencias relativas, necesidad de material rodante, etc. (Gobierno de Chile, Comisión Nacional de Medio Ambiente, 2001).

Históricamente, los indicadores en el ámbito de la GIRSU, comenzaron a desarrollarse en el año 1969 con la publicación de guías o informes de organismos de gobierno de ciudades de Estados Unidos y Europa (Samjeevi & Shahabudeen, 2015). Por su parte, el Banco Mundial, también comenzó con estudios y trabajos de consultoría a los países, resultando en la publicación *Refuse Collection Vehicles for Developing Countries* (United Nations Center for Human Settlements (UNCHS), 1989). Seguidamente, en 1998, se registran los primeros estudios e investigaciones de instituciones internacionales, como el informe sobre estadísticas de generación de RSU de 14 países Europeos, brindado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), en la conferencia de

Copenhague en 1998 (EEA, 1998). Asimismo, muchas publicaciones de dicha época, comparaban casos de estudio y determinaban guías de buenas prácticas.

### 2.3.1. Relevamiento de Indicadores GIRSU

Se realizó una completa revisión de trabajos científicos, informes internacionales, nacionales, provinciales y municipales, de organizaciones públicas, privadas y no gubernamentales, referidos a la GIRSU. Se revisaron alrededor de 50 publicaciones (nacionales e internacionales) relacionadas a la GIRSU y al desarrollo de indicadores ambientales. Se identificaron los indicadores y parámetros para la GIRSU que se mencionaban en cada caso y se los clasificó en función del grado de avance de gestión necesaria para que un municipio pueda medirlo. De esta forma se consideraron indicadores básicos, intermedios y avanzados. Los mismos se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de indicadores por grado de avance de la gestión. Elaboración propia

Clasificación de indicadores por grado de avance de la gestión	
Básicos	Cualquier municipio con un sistema de recolección de RSU podría medirlo.
Intermedios	Municipios con algún tipo de recuperación frecuente de materiales reciclables.
Avanzados	Municipios con recuperación, tratamiento y venta de materiales reciclables.

El criterio de clasificación utilizado se determinó luego de relevar la información tan variada encontrada. Es decir, la diversidad es tal que, en algunos de los artículos más antiguos analizados como Bahia (1996) y Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda (2000), se presentan indicadores que tienen en cuenta, por ejemplo, los ingresos obtenidos a partir de la gestión de los RSU. Mientras que en publicaciones más recientes como el informe de la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina (2014) sólo se evalúa la disposición final de los RSU, la composición y la generación por habitantes, entre otros indicadores elementales.

Asimismo, se consideró importante la distinción en función de la realidad y situación actual diferente de cada municipio, sobre todo en el país. Por un lado se encuentran ciudades que aún utilizan basurales a cielo abierto como método de disposición final mientras que otras localidades ya integran al sistema de GIRSU plantas de reciclado y obtención de materias primas. En este sentido, hablar de indicadores que evalúen, por ejemplo, el nivel de aceptación de la sociedad de separar la basura en sus hogares no tiene sentido para un municipio que no aplica un programa de recolección diferenciada de RSU. La forma de clasificar los indicadores puede ayudar a los municipios, en primer

lugar, a ubicarse en que grado de avance se encuentran respecto a la gestión de RSU, y luego a orientarse en las estrategias a desarrollar en pos de avanzar hacia el desarrollo sustentable en la GIRSU. Cabe destacar que la ausencia de la medición de un indicador no sólo señala que no hay control o seguimiento de determinado sistema sino también ausencia de dicho sistema, la cual es una situación aun peor.

Una vez realizada la clasificación mencionada, se utilizaron algunos criterios de Puma-Chávez et al. (2011) para re-clasificar los indicadores en cada una de las categorías según el área específica de aplicación. Estos son: generación, recolección, disposición final, opinión social y concientización, y eficiencia.

Como resultado de la revisión de la literatura se identificaron más de 150 indicadores diferentes en torno a la GIRSU. De los mismos, se seleccionaron aquellos indicadores que significan una ayuda a la toma de decisión, seguimiento y control en la gestión táctica de RSU, objeto de la presente Tesis Doctoral. Es decir, indicadores ligados a la generación, recolección, transporte, valorización de RSU, utilización recursos y concientización de la población. Se obtuvieron 90 índices para la GTRSU, los cuáles se muestran clasificados en la Tabla 10 a 14.

Cabe destacar y es interesante observar dónde se concentran las mayores cantidades de indicadores en cada una de las categorías de grado de avance. En los indicadores para municipios de gestión básica se centra la atención en la disposición final. Estos tienen que ver con el tipo de disposición final (relleno sanitario, basural a cielo abierto o incineración), la velocidad de llenado y vida útil del relleno sanitario, el tratamiento de los gases y lixiviados producidos en el mismo, el manejo de RSU por parte de recolectores informales, entre otros. Tiene sentido que los municipios que solo tienen implementados una gestión de RSU básica hagan hincapié en la disposición final ya que significa una primera e importante aproximación a una gestión sustentable e integral de RSU. El foco está puesto en generar un área apta para la disposición final de residuos, controlando los lixiviados y los gases que se generan. Respecto a la eficiencia y opinión social de los municipios de gestión básica, los indicadores apuntan a mejorar la eficiencia con la que opera el sistema como en aumentar el porcentaje de viviendas alcanzadas por el sistema de GIRSU o disminuir los costos implicados en el mismo.

En los indicadores intermedios, la mayoría se encuentra en la generación. Esto es porcentaje de materiales reciclables recuperados (cartón, papel, vidrio, plástico, metal) y

residuos orgánicos para la realización de compostaje. También incluye la recuperación de aceite usado, y promoción de estrategias empresariales para la diferenciación y tratamiento de sus residuos.

Los indicadores avanzados presentan mayoría en la generación y la eficiencia. En el primer caso, hay que tener en cuenta que se refiere a generación de nuevos productos o materias primas a partir de residuos recuperados y a la generación de energía. Respecto a la eficiencia, tiene que ver con la búsqueda de la autonomía económica del sistema, buscando aumentar los ingresos por ventas de residuos reciclables o ahorros obtenidos por generación de energía.

Tabla 10. Indicadores recolectados ligados a la generación de RSU, según clasificación. Elaboración propia.

<b>Generación</b>		
<b>Básicos</b>	<b>Intermedios</b>	<b>Avanzados</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de RSU/año</li> <li>• Generación de RSU/hab/día</li> <li>• Composición de los RSU</li> <li>• Generación de RSU por nivel de ingresos o clases sociales</li> <li>• Porcentaje de aumento de generación de RSU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grado de avance en la separación en origen anual</li> <li>• Porcentaje de material recuperable recolectado (inorgánicos y orgánicos)</li> <li>• Porcentaje de material recuperable inorgánicos</li> <li>• Porcentaje de material recuperable orgánico</li> <li>• Porcentaje total de casas que separan sus residuos en relación al total de casas</li> <li>• Porcentaje de reducción de generación de RSU</li> <li>• Cantidad de pilas recolectadas</li> <li>• Cantidad recolectado de papel y cartón</li> <li>• Cantidad recolectado de vidrio</li> <li>• Cantidad recolectado de plástico</li> <li>• Generación de RSU peligrosos</li> <li>• Cantidad de aceite utilizado recolectado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de aceite reutilizado</li> <li>• Valor comercial de los materiales reciclables recuperados</li> <li>• Cantidad de materia prima hecha con materiales reciclables</li> <li>• Relación entre el total de materiales reciclables recuperados y los comercializados por año</li> <li>• Número de industrias de reciclaje locales</li> </ul>

Tabla 11. Indicadores recolectados ligados a la recolección de RSU, según clasificación. Elaboración propia.

Indicadores en la Recolección		
Básicos	Intermedios	Avanzados
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje viviendas alcanzadas por la recolección</li> <li>• Total de toneladas recolectadas en relación a las generadas</li> <li>• Porcentaje de vehículos en operación en relación al total de vehículos</li> <li>• Consumo de combustible</li> <li>• Distancia recorrida por camión por unidad de residuo recolectado</li> <li>• Tiempo de recolección por camión por unidad de residuo recolectado</li> <li>• Cantidad de combustible por camión de recolección por unidad de residuo recolectado</li> <li>• Capacidad total de los camiones de recolección</li> <li>• Porcentaje de la población que presenta recolección frecuente</li> <li>• Porcentaje de RSU recolectado por recolectores informales</li> <li>• Porcentaje de domicilios con almacenaje exterior adecuado de RSU</li> <li>• Promedio de número de empleados por camión de recolección</li> <li>• Total de toneladas recolectadas en relación a la capacidad total de los camiones de recolección.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de centros/puntos de colección de materiales reciclables/habitante</li> <li>• Número de contenedores diferenciados por tipo de material según diferentes clases sociales</li> <li>• Porcentaje de población sin facilidades para reciclar 1km a la redonda</li> <li>• Consumo de combustible por residuo reciclable no segregado</li> <li>• Disponibilidades de recolección diferenciada por habitante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de Centros de reciclaje por habitantes</li> <li>• Porcentaje de casas que descargan sus residuos en contenedores retornables</li> <li>• Porcentaje del ingreso familiar gastado en contenedores retornables de almacenamiento de residuos en un año, por sector social</li> <li>• Relación entre los km recorridos y la cantidad de RSU diferenciados recolectados.</li> <li>• Relación entre el tiempo que de recolección y la cantidad de RSU reciclables recolectados.</li> <li>• Frecuencia de actualización de los itinerarios de recolección</li> <li>• Porcentaje de población alcanzada por el sistema de contenedores diferenciados</li> </ul>

Tabla 12. Indicadores recolectados ligados a la disposición final de RSU, según clasificación. Elaboración propia.

Indicadores en la Disposición Final		
Básicos	Intermedios	Avanzados
<ul style="list-style-type: none"> <li>• RSU por tipo de disposición: RS, Vertedero semi controlado, Basurales, incineración, Reciclado.</li> <li>• Porcentaje de RSU dispuestos en RS sobre el total de RSU generados</li> <li>• Vida útil del Relleno Sanitario</li> <li>• Área utilizada del relleno sanitario por año</li> <li>• Relación entre la capacidad del RS y el promedio diario de generación de RSU a 4 años</li> <li>• Relación entre el área del RS y el número de personas que vivirán a 500m del RS cuando este se cierre.</li> <li>• Porcentaje de RSU que son recolectados por trabajadores informales en los RS</li> <li>• Porcentaje de la población afectada por ruidos, olores, etc, del RS</li> <li>• Porcentaje de la población afectada por ruidos, olores, etc, del RS, según sectores sociales</li> <li>• Porcentaje de la población afectada por CO<sub>2</sub>, del RS,</li> <li>• Porcentaje de la población afectada por metano CH<sub>4</sub>, del RS</li> <li>• Relación entre la población según sector social, que vive a 500m de basurales.</li> <li>• Existencia de viviendas precarias en el predio de disposición final o sus alrededores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje del RS salvado por la segregación de materiales reciclables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje del RS que pasa a convertirse a área limpia</li> <li>• Cantidad de energía producida desde el RS</li> <li>• Cantidad de energía producida por incineración</li> </ul>

Tabla 13. Indicadores recolectados ligados a la opinión social y concientización, según clasificación. Elaboración propia.

Indicadores para la Opinión Social y Concientización		
Básicos	Intermedios	Avanzados
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de personas que no están conformes con el sistema de GRSU</li> <li>• Número de reclamos de la población al sistema de GRSU</li> <li>• Afectación de la salud pública por manejo inadecuado de los residuos</li> <li>• Calidad del servicio (limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final)</li> <li>• Aceptación pública de los planes y acciones de GRSU</li> <li>• Participación pública en planeación e implementación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de campañas de concientización por año</li> <li>• Número de puestos de trabajo asociados a la recuperación de materiales</li> <li>• Identificación de organizaciones civiles que trabajan en temas afines a los RSU (ONG, instituciones académicas y profesionales, etc.).</li> <li>• Porcentaje de la población dispuesta a participar en la separación de los residuos sobre el total de la población</li> <li>• Porcentaje de comentarios a favor del reciclaje</li> <li>• Porcentaje de personas consientes de los programas de segregación de materiales reciclables de la ciudad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de la población afectada por ruidos, olores, etc, de una planta de tratamiento de RSU</li> </ul>

Tabla 14. Indicadores de eficiencia recolectados, según clasificación. Elaboración propia.

Indicadores en la Eficiencia		
Básicos	Intermedios	Avanzados
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo total de recolección por tonelada</li> <li>• Eficiencia de camiones recolectores</li> <li>• Costo total de disposición final por tonelada</li> <li>• Número de habitantes por cada operario dedicado a la recolección de RSU.</li> <li>• Coste medio de GRSU por habitante</li> <li>• Financiamiento del servicio: tasas municipales, financiamiento provincial, nacional, otro</li> <li>• Costos totales en la GRSU</li> <li>• Cantidad de personal empleado en limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final</li> <li>• Cantidad de personal empleado capacitado en limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de material rechazado en plantas de acopio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingresos por venta de materiales reciclables</li> <li>• Beneficios obtenidos en la venta de energía del RS, como porcentaje de los costos de generarla</li> <li>• Autonomía económica del sistema de GRSU</li> </ul>

Los mencionados indicadores, según su fuente bibliográfica, se muestran en la siguiente Tabla 15.

Tabla 15. Referencias bibliográficas de los indicadores recolectados según clasificación. Elaboración propia.

Indicadores relevados	Fuente
<b>Gestión Básica</b>	
Generación de RSU/año <sup>10</sup>	(Passarini, et al., 2011) (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014) (Desmond, 2006) (Arendse & Godfrey, 2010) (Secretaria de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015)
Generación de RSU/hab/día <sup>10</sup>	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001) (Secretaria de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015)

Composición de los RSU <sup>10</sup>	(Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014)
Generación de RSU por nivel de ingresos o clases sociales	(Passarini, et al., 2011) (Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de aumento de generación de RSU	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje viviendas alcanzadas por la recolección	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001) (Puma-Chávez, et al., 2011) (Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015)
Total de toneladas recolectadas en relación a las generadas	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje de vehículos en operación en relación al total de vehículos	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Consumo de combustible	(Pasculli, 2015)
Distancia recorrida por camión por unidad de residuo recolectado	(Teixeira, et al., 2014)
Tiempo de recolección por camión por unidad de residuo recolectado	(Teixeira, et al., 2014)
Cantidad de combustible por camión de recolección por unidad de residuo recolectado	(Teixeira, et al., 2014) (Rodrigues Bahia, 1996)
Capacidad total de los camiones de recolección	(Arendse & Godfrey, 2010)
Porcentaje de la población que presenta recolección frecuente	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de RSU recolectado por recolectores informales	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de domicilios con almacenaje exterior adecuado de RSU	(Andolini, 2014)
Promedio de número de empleados por camión de recolección	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Total de toneladas recolectadas en relación a la capacidad total de los camiones de recolección	(Puma-Chávez, et al., 2011)
RSU por tipo de disposición: RS, Vertedero semi controlado, Basurales, incineración, Reciclado.	(Ministry for the Enviroment, 2000) (Cifrian, et al., 2010) (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014)
Porcentaje de RSU dispuestos en RS sobre el total de RSU generados	(Arendse & Godfrey, 2010)
Vida útil del Relleno Sanitario	(Arendse & Godfrey, 2010)
Área utilizada del relleno sanitario por año	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre la capacidad del RS y el promedio diario de generación de RSU a 4 años	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre el área del RS y el número de personas que vivirán a 500m del RS cuando este se cierre <sup>11</sup> .	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de RSU que son recolectados por trabajadores informales en los RS	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de la población afectada por ruidos, olores, etc, del RS	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje %de la población afectada por ruidos, olores, etc, del RS, según sectores sociales	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de la población afectada por CO2, del RS,	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de la población afectada por metano CH4, del RS	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre la población según	(Rodrigues Bahia, 1996)

<sup>10</sup> Indicadores calculados en casi todos los países y encontrados en muchísimas páginas web que tienen información al respecto como ISWA, Agencat, Eurostat, BID, entre otros.

<sup>11</sup> Es para ver el potencial del RS una vez cerrado como área de ocio.

sector social, que vive a 500m de basurales.	
Existencia de viviendas precarias en el predio de disposición final o sus alrededores.	(Andolini, 2014)
Costo total de recolección por tonelada	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001) (Puma-Chávez, et al., 2011)
Eficiencia de camiones recolectores <sup>12</sup>	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001)
Costo total de disposición final por tonelada	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001) (Desmond, 2006)
Número de habitantes por cada operario dedicado a la recolección de RSU.	(Andolini, 2014)
Coste medio de GRSU por habitante	(Andolini, 2014)
Financiamiento del servicio: tasas municipales, financiamiento provincial, nacional, otro	(Andolini, 2014)
Costos totales en la GRSU	(Arendse & Godfrey, 2010)
Cantidad de personal empleado en limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final	(Rondón Toro, et al., 2016)
Cantidad de personal empleado capacitado en limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final	(Rondón Toro, et al., 2016)
Porcentaje de personas que no están conformes con el sistema de GRSU	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Número de reclamos de la población al sistema de GRSU	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001)
Afectación de la salud pública por manejo inadecuado de los residuos	(Andolini, 2014)
Calidad del servicio (limpieza, pre-recolección, recolección traslado y disposición final)	(Puma-Chávez, et al., 2011) (Rondón Toro, et al., 2016)
Aceptación pública de los planes y acciones de GRSU	(Desmond, 2006)
Participación pública en planeación e implementación	(Desmond, 2006) (Rondón Toro, et al., 2016)
<b>Gestión Intermedia</b>	
Grado de avance en la separación en origen anual	(Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015)
Porcentaje de material recuperable recolectado (inorgánicos y orgánicos)	(Ministry for the Environment, 2000) (Rodrigues Bahia, 1996) (Passarini, et al., 2011) (Desmond, 2006) (Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015)
Porcentaje de material recuperable inorgánicos	(Cifrian, et al., 2010; Arendse & Godfrey, 2010)
Porcentaje de material recuperable orgánico	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje total de casas que separan sus residuos en relación al total de casas	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje de reducción de generación de RSU	(Rodrigues Bahia, 1996)
Cantidad de pilas recolectadas	Indicadores utilizados en numerosos trabajos y expuestos en numerosos sitios web.
Cantidad recolectado de papel y cartón	
Cantidad recolectado de vidrio	
Cantidad recolectado de plástico	
Generación de RSU peligrosos	

<sup>12</sup> Eficiencia de camiones recolectores<sup>12</sup> (tn recolectadas por semana/ capacidad camiones\* n°de viajes por semana)

Cantidad de aceite utilizado recolectado	
Cantidad de centros/puntos de colección de materiales reciclables/habitante	(Ministry for the Environment, 2000)
Número de contenedores diferenciados por tipo de material según diferentes clases sociales	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de población sin facilidades para reciclar 1km a la redonda	(Rodrigues Bahia, 1996)
Consumo de combustible por residuo reciclable no segregado	(Pasculli, 2015)
Disponibilidades de recolección diferenciada por habitante	(Desmond, 2006)
Porcentaje del RS salvado por la segregación de materiales reciclables	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de material rechazado en plantas de acopio	(Ministry for the Environment, 2000)
Número de campañas de concientización por año	(Ministry for the Environment, 2000)
Número de puestos de trabajo asociados a la recuperación de materiales	(Ministry for the Environment, 2000)
Identificación de organizaciones civiles que trabajan en temas afines a los RSU (ONG, instituciones académicas y profesionales, etc.).	(Andolini, 2014)
Porcentaje de la población dispuesta a participar en la separación de los residuos sobre el total de la población	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje de comentarios a favor del reciclaje	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje de personas consientes de los programas de segregación de materiales reciclables de la ciudad	(Puma-Chávez, et al., 2011)
<b>Gestión Avanzada</b>	
Cantidad de aceite reutilizado	
Valor comercial de los materiales reciclables recuperados	(Arendse & Godfrey, 2010)
Cantidad de materia prima hecha con materiales reciclables	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre el total de materiales reciclables recuperados y los comercializados por año	(Rodrigues Bahia, 1996)
Número de industrias de reciclaje locales	(Ministry for the Environment, 2000)
Cantidad de Centros de reciclaje por habitantes	(Ministry for the Environment, 2000)
Porcentaje de casas que descargan sus residuos en contenedores retornables	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje del ingreso familiar gastado en contenedores retornables de almacenamiento de residuos en un año, por sector social	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre los km recorridos y la cantidad de RSU diferenciados recolectados.	(Rodrigues Bahia, 1996)
Relación entre el tiempo que de recolección y la cantidad de RSU reciclables recolectados.	(Rodrigues Bahia, 1996)
Frecuencia de actualización de los itinerarios de recolección	(Rodrigues Bahia, 1996)
Porcentaje de población alcanzada por el sistema de contenedores diferenciados	(Desmond, 2006)
Porcentaje del RS que pasa a	(Rodrigues Bahia, 1996)

convertirse a área limpia	
Cantidad de energía producida desde el RS	(Cifrian, et al., 2010)
Cantidad de energía producida por incineración	(Cifrian, et al., 2010)
Ingresos por venta de materiales reciclables	(Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001)
Beneficios obtenidos en la venta de energía del RS, como porcentaje de los costos de generarla	(Rodrigues Bahia, 1996)
Autonomía económica del sistema de GRSU	(Puma-Chávez, et al., 2011)
Porcentaje de la población afectada por ruidos, olores, etc, de una planta de tratamiento de RSU	(Rodrigues Bahia, 1996)



## **CAPÍTULO III**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS**



### 3.1. Revisión de metodologías y herramientas en la GIRSU

En la comunidad científica mundial, muchas publicaciones abordan las problemáticas de la GIRSU, proponiendo herramientas y modelos para la ayuda en la toma de decisiones que busquen resolver o atenuar dichas problemáticas (Saarenmaa, et al., 2002). Como es sabido, en lo concerniente al impacto medio ambiental, hay 4 criterios importantes a tener en cuenta: económico, social, medioambiental y político. Estos aspectos, seguramente entren en conflicto a la hora de determinar una solución eficiente para un determinado plan (Abou Najm & El-Fadel, 2004). Sumado a esto, la falta de datos o la gran cantidad de consideraciones a tener en cuenta, resultan en un gran nivel de incertidumbre para los gestores, dificultando su labor en analizar, clasificar y seleccionar la alternativa más conveniente (Abou Najm, et al., 2002).

En estas situaciones, el uso de las herramientas de Investigación Operativa (IO), pueden proveer un enfoque racional y científico para determinar cuál es la mejor decisión, usando métodos como optimización matemática, análisis estadístico, métodos probabilísticos, simulación o inteligencia artificial (Morrissey & Browne, 2004). Asimismo, las Tecnologías de Información y Comunicación (TICS) contribuyen a la creación de modelos que puedan representar situaciones más reales que den soporte a la toma de decisión, como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), los Sistemas de Información Geográfica (GIS) o la Identificación por Radio Frecuencia (IDRF), entre otros (Sanjeevi & Shahabudeen, 2015). En la Figura 17 y Figura 18, se observan las categorías de IO y TICS respectivamente, utilizadas como soporte a la toma de decisión según (Vitorino de Souza Melaré, et al., 2017), en los sistemas de GIRSU.

En el mismo artículo se realiza un trabajo de revisión bibliográfica sobre metodologías utilizadas en la toma de decisiones en torno a la GIRSU. En primera instancia se agruparon las aplicaciones abordadas y posteriormente se identificó las herramientas más utilizadas en cada caso. Las aplicaciones señaladas son las siguientes:

- A1. Gestión de la recolección, rutas y transporte
- A2. Gestión y monitoreo de contenedores
- A3. Reciclaje de RSU y gestión de residuos electrónicos
- A4. Administración pública y desarrollo sustentable
- A5. Métodos de previsión y planificación
- A6. Localización de sitios de disposición final de RSU.

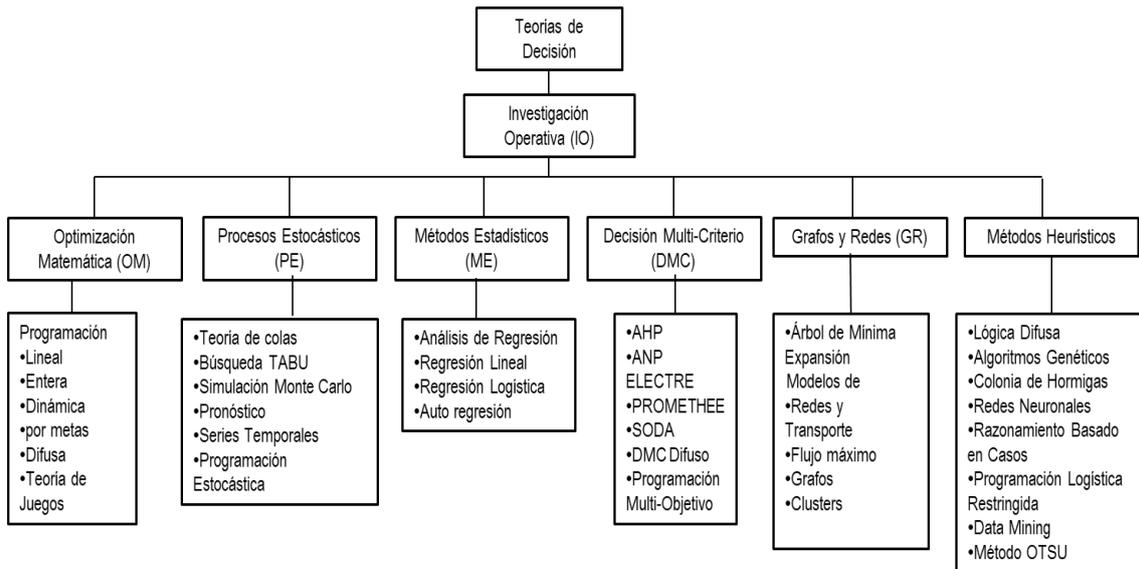


Figura 17. Herramientas y métodos dentro de la investigación operativa utilizadas en la GIRSU según Vitorino de Souza Melaré, et al. (2017)

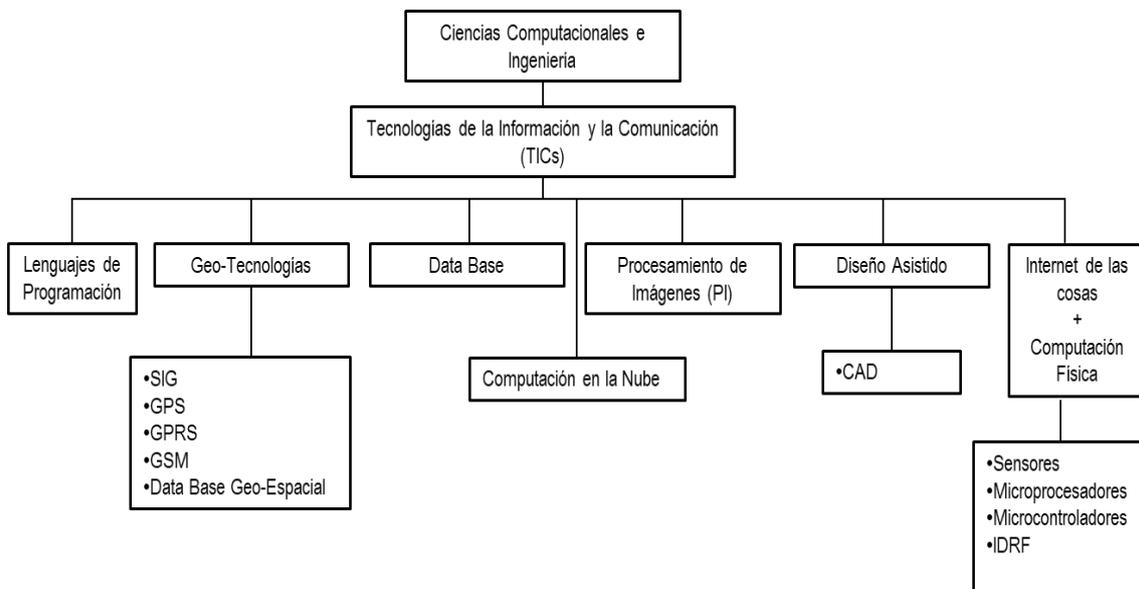


Figura 18. Herramientas y métodos dentro de las TICs utilizadas en la GIRSU según Vitorino de Souza Melaré, et al. (2017)

En la Figura 19 se puede observar que los métodos heurísticos son más utilizados en las aplicaciones A1, A2 y A3, mientras que la optimización matemática prevalece en A4 y A5 (más del 50% de las publicaciones), y los métodos de DMC aparecen en un 90% en A6. Mirando el gráfico de TICs, Figura 20, los SIGs, son la única tecnología que aparece, al menos en un pequeño porcentaje, en todas las aplicaciones, con mayoría en A2 y A6. Aunque el grupo Otros (O), también se muestra en todas las aplicaciones, no se refiere a una tecnología en particular, sino a un grupo de ellas. También puede resaltarse que A2 es la aplicación que más intensamente utiliza todas las TICs observadas.

En lo que concierne a la GTRSU, podrían considerarse las aplicaciones A1, A2 y A4, donde predominan para A1 la utilización de PE, GR, MH y todas las TICs menos PI; para A2, MH y todas las TICs; y para A4 MO, PE y DMC. Respecto a la GERSU, se consideran las aplicaciones A5 y A6, donde las metodologías mayormente utilizadas son MO, MH y SIG para la previsión y planificación (A5) y DMC para la localización de sitios de disposición final (A6).

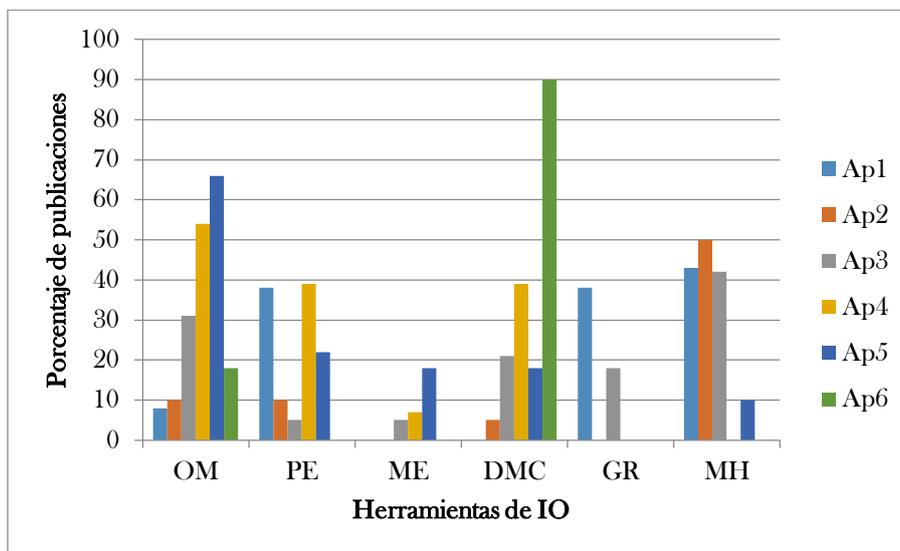


Figura 19. Porcentajes de publicaciones según cada aplicación que utilizan herramientas de la IO, según Vitorino de Souza Melaré, et al. (2017)

Dentro de la gran cantidad de técnicas mencionadas, a continuación, se profundiza sobre las herramientas de mayor interés dentro del trabajo y luego se desarrollan los fundamentos teóricos de las mismas.

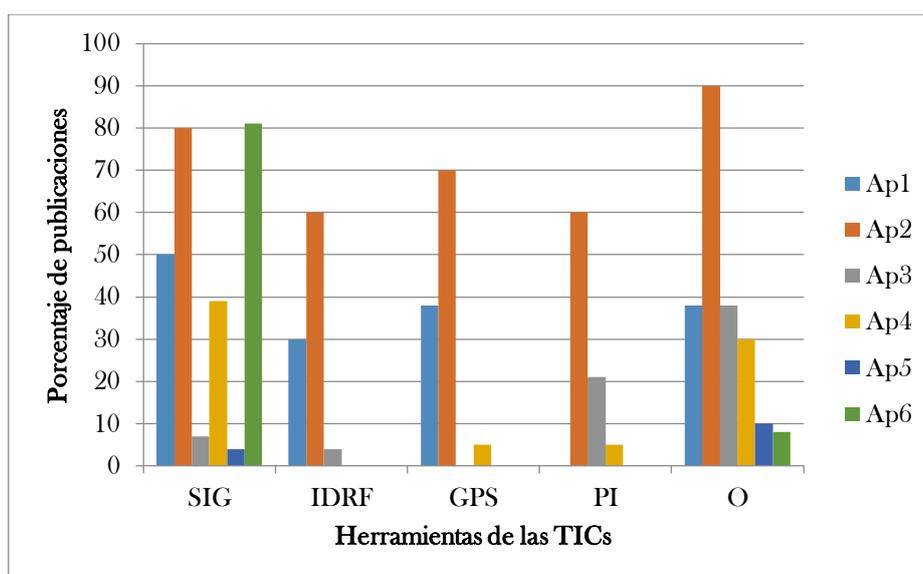


Figura 20. Porcentajes de publicaciones según cada aplicación que utilizan herramientas de las TICs, según Vitorino de Souza Melaré, et al. (2017)

### 3.1.1. Herramienta para medir eficiencia

Dado que uno de los principales objetivos de la presente tesis doctoral es evaluar la eficiencia de los sistemas de GIRSU, es necesario definir la herramienta que operará en tal actividad. En este sentido, Data Envelopment Analysis (DEA) es una metodología que sirve para estudiar la eficiencia relativa de una serie de unidades similares (DMU), basada en modelos de programación lineal. Estas unidades o sistemas similares utilizan entradas o *inputs* para producir salidas u *outputs*, de manera que, las unidades más eficientes serán aquellas que maximicen la relación *output/input*. En la sección 4.3, DEA será explicada con mayor precisión. Si bien podrían utilizarse otras herramientas para medir eficiencia, como redes neuronales artificiales o regresión lineal, DEA fue seleccionada en este caso por sus pocos requisitos o condiciones para su aplicación. Por ejemplo, por la baja cantidad mínima de DMUs necesarias, situación que no coincide con las demás técnicas mencionadas que requieren una cantidad de unidades de análisis muchísimo mayor. Asimismo, los resultados de DEA aportan información sobre las holguras existentes, las DMUs de referencia y los rendimientos de escala, datos muy valiosos a la hora de comparar la GIRSU de las localidades en cuestión. A su vez, DEA permite agregar dentro del modelo, restricciones particulares a los *inputs* y *outputs*, como por ejemplo (y cómo se verá más adelante) casos donde el *input* deba ser acotado y no pueda disminuir más allá de cierto valor.

En lo que se refiere a la medición de eficiencia con la que operan los sistemas de recolección de RSU, la técnica DEA se ha utilizado en numerosas ocasiones, con el objetivo de comparar el desempeño de las ciudades en diferentes países. Ali, Yadav, Anis, & Sharma (2015) integran DEA a la gestión de residuos peligrosos en EEUU. Baba, Purwanto, & Sunoko (2015) Villavicencio & Didonet (2009) evalúan la eficiencia en municipios del estado Graha Padma y Catalunya, respectivamente. En este último se utilizan tres modelos orientados al *output* con rendimientos constantes para evaluar 48 municipios. En el primero se consideran 2 *inputs* (cantidad de RSU recolectados y cantidad de habitantes por municipio) y 4 *output* deseables (cantidad de RSU orgánicos, vidrio, papel y envases). El segundo sólo considera la cantidad de habitantes como *input* mientras que determina la cantidad de RSU dispuesto en el relleno sanitario como *output* indeseado. El tercer modelo integra los *inputs* y *outputs* de los modelos anteriores, invirtiendo el valor del *output* indeseado (elevado a la potencia -1). De dicho análisis resultan sólo dos municipios (Reus y Vic) como eficientes en los 3 casos.

### 3.1.2. Herramientas de predicción

Siguiendo con los objetivos de estudio presentados, es necesario determinar una herramienta que permita predecir y estimar movimientos (aumento o disminución) de recursos en pos de obtener una gestión eficiente. Para ello, se debe estudiar el comportamiento y relación entre las variables definidas, el cual puede o no ser conocido de ante mano. La metodología de Regresión Lineal (RL) definirá dicha relación, mientras que la herramienta de Red Neuronal Artificial (RNA), basada en un método heurístico, estimará predicciones a partir de comparaciones, pero sin definir cuál es la relación entre las variables de estudio. Dado que la cantidad de datos con la que se trabajará puede resultar escasa para la utilización y mejor desempeño de dichas herramientas, es que ambas fueron elegidas para realizar los análisis y, posteriormente, comparar los resultados y seleccionar los más apropiados.

Las RNAs han sido y son utilizadas, como herramienta de predicción, en una gran variedad de ámbitos como ingeniería (ver, por ejemplo, Esfe y otros (2014)), economía y finanzas (ver, por ejemplo, Feng & Zhang (2014)), medicina (ver, por ejemplo, Amato y otros (2013)), entre otros. En lo que respecta a GIRSU, muchos trabajos utilizan RNAs para predecir la generación de RSU, como en los casos de Jafarzadeh & Hashempour (2015) y Batinic, y otros (2011) donde agregan la predicción de la composición de los RSU a través de indicadores socioeconómicos; en Zade & Noori (2007) se desarrolla un modelo de predicción de la cantidad de RSU semanal en una ciudad turística donde los factores son muy variables durante el año (Mashhad, Irán), o en Jahandideh, y otros (s.f.), el cual se enfoca en la generación y composición de residuos hospitalarios, utilizando 50 hospitales en Fars, Irán. Asimismo, las RNAs también se han utilizado en áreas relacionadas al reciclaje como en Liu, Liu, Wang, & Liu, (2002), donde se plantea un modelo de determinación del potencial reciclaje de un producto teniendo en cuenta la opinión y la valorización de expertos en determinados factores de influencia; o en Mazhar, Kara, & Kaebernick (2007) quien usa RNA para modelar y predecir la degradación de productos que integran materiales reciclados.

Otra técnica de predicción muy utilizada es la regresión lineal (RL) de la cual pueden encontrarse una gran cantidad trabajos relacionados con la GIRSU que la utilizan. Por ejemplo, en (Benítez, et al., 2008) se plantean y comparan distintos modelos de RL que relacionan la generación de RSU per cápita con las variables educación, ingreso por hogar y número de residentes, basado en datos de una ciudad mexicana (Mexicali). En un estudio realizado en Chile por (Orccosupa, 2002) se analiza la relación entre la

producción de RSU per cápita con el ingreso económico y el consumo de energía eléctrica. En (Qdais, et al., 1997) se realiza un estudio en la ciudad de Abu Dhabi, donde el análisis de regresión lineal reveló que la tasa de generación promedio de RSU dependía del nivel de ingresos con un aumento de alrededor del 35% para los residentes de altos ingresos sobre la tasa promedio. Por otro lado, en (Buenrostro, et al., 2001) la generación de RSU y no urbanos se pronosticó mediante un análisis de regresión lineal múltiple. Para las fuentes residenciales, las variables independientes analizadas fueron los salarios mensuales, las personas por vivienda, la edad y el nivel educativo de los jefes de familia. Para las fuentes no residenciales, las variables analizadas fueron el número de empleados, el área de las instalaciones, el número de días hábiles y las horas de trabajo por día. Los valores pronosticados para residuos residenciales fueron similares a los observados.

### 3.1.3. Integración de herramientas

De la literatura revisada, se han encontrado trabajos que integran las técnicas DEA y RNAs de diferentes formas y en variados contextos. Los primeros en proponer una investigación al respecto fueron Athanassopoulos & Curram (1996) quienes determinaron que DEA y las RNAs son métodos comparables y potencialmente complementarios en la evaluación de desempeño y medición de eficiencia. Wu (2009) desarrolla un modelo híbrido utilizando DEA, RNA y Árbol de decisión (DT) para evaluar la performance de proveedores. El mismo se divide en un primer módulo donde aplica DEA para clasificarlos en eficientes e ineficientes y un segundo módulo donde, a partir de la información del primer módulo, entrena las RNAs y el DT para luego evaluar futuros y posibles proveedores. En Çelebi & Bayraktar (2008) también se utiliza un modelo integrado para analizar proveedores, pero en este caso se utiliza en primer lugar una RNA para determinar cuáles son los mejores indicadores de desempeño a utilizar para luego aplicarlos y medir la eficiencia de los proveedores con DEA. En Kuo, Wang & Tien (2010) se definen criterios para la selección de proveedores sustentables mediante el método Delphi<sup>13</sup>, a la vez que se determina un indicador mediante ANP (Analytic Network Process) que dará los pesos correspondientes a cada criterio definido. Luego se entrenan y predicen los valores de medición de desempeño de cada proveedor mediante una RNA. Por último, se combinan dichos *outputs* con DEA, resultando en un modelo denominado RNA-MADA, que hará una evaluación final de cada proveedor. En Mostafa

---

<sup>13</sup> El método Delphi recopila datos a través de entrevistas a expertos.

(2009) y en Wu, Yang & Liang (2006) se evalúa la eficiencia de bancos Árabes y Canadienses, respectivamente, comparando el desempeño de cada técnica. Kwon & Lee (2016) también utiliza información de bancos, en EEUU, y realiza un modelo de dos etapas secuenciales, que integran DEA y RNAs con el objetivo de predecir los beneficios a obtener. En el trabajo de Sreekumar & Mahapatra (2011) se utilizan dos de los modelos de medición de eficiencia de DEA (CCR y BCC) para evaluar el desempeño de Indian B-schools. Posteriormente, con la salida de dicha evaluación, se entrena una RNA para luego predecir los *outputs* de aquellas DMUs de las cuales no se disponen los datos de forma completa. Análogamente, en Kwon, Lee & Roh (2016), se aplica un modelo similar en la evaluación de industrias electrónicas Japonesas, donde la RNA entrenada se utiliza para predecir los recursos necesarios en industrias hipotéticas de mayor tamaño.

En (Jahandideh, et al., 2009) se aplicaron dos modelos de predictores que incluyen RNA y RL para predecir la tasa de generación de desechos médicos totales y de tipos agudos, infecciosos y generales. Se utilizó un procedimiento de validación cruzada en una base de datos que contiene un total de 50 hospitales de la provincia de Fars (Irán) para verificar el rendimiento de los modelos. Por su parte, en (Comrie, 1997) se investiga la posibilidad de utilizar RNA para pronosticar la contaminación por ozono, en comparación con los modelos de RL tradicionales. Las estadísticas de comparación de modelos indican que las técnicas de RNA son algo (pero no dramáticamente) mejores que los modelos de RL para la predicción diaria del ozono, y que todos los tipos de modelos son sensibles a diferentes regímenes de clima y ozono. En (Azadi & Karimi-Jashni, 2016) se verificó el rendimiento de dos modelos predictivos, uno de RNA y otro de RL para predecir la tasa media de generación de RSU Estacionales. La precisión de los modelos propuestos se ilustra a través de un estudio de caso de 20 ciudades ubicadas en la provincia de Fars, Irán. El modelo de RL mostró un rendimiento de predicción pobre mientras que el de RNA, como modelo no lineal, demostró tener mayor precisión predictiva.

### **3.2. Indicadores**

En términos técnicos, un indicador se define como una función de una o más variables, que conjuntamente miden una característica o atributo de los individuos en estudio en estudio (Soto & Schuschny, 2009). El principal uso de un indicador es proveer información para la toma de decisiones, ya sea como alarma, monitoreo, seguimiento o comparación, pudiendo mostrar si un ítem, actividad o sistema está funcionando en los niveles preestablecidos, identificando la existencia o no de situaciones problemáticas. Los

indicadores pueden derivarse de ciclos de mejora, de actividades de diseño de los servicios, o ser fruto de una selección de aspectos o servicios relevantes de un determinado centro cuya desempeño interesa controlar (Saturno, 2004).

El indicador puede ser un índice fácil de calcular o una función muy compleja que tenga en cuenta muchas variables. En este último caso, se habla de indicador compuesto en el sentido que agrega varios indicadores específicos en un solo número. Un indicador compuesto es una representación simplificada que busca resumir un concepto multidimensional en un índice simple (unidimensional) con base en un modelo conceptual subyacente. Puede ser de carácter cuantitativo o cualitativo según los requerimientos del analista. Que se los conciba como número-resumen los hace especialmente útiles como indicadores para comparar centros, áreas o sistemas, aunque también pueden utilizarse para unidades organizativas más simples. La principal ventaja que posee es que provee una visión global, y pueden ser interpretados más fácilmente que el escrutinio de muchos indicadores por separado. Las desventajas se presentan en la minuciosidad del diseño, ya que si están mal diseñados, pueden dar lugar a mensajes erróneos, confusos o poco robustos. Asimismo, al reducir la complejidad de un tema en algo supuestamente mensurable, pueden dar lugar a sesgos de confirmación o a la simplificación excesiva, lo cual a su vez acarrea un alto nivel de incertidumbre asociado a la integración de escalas y dimensiones diversas.

Para algunos autores sería deseable que los subindicadores dentro del indicador compuesto, estuviesen relacionados entre sí, incluso estadísticamente. Sin embargo, el principal cuerpo teórico en este campo considera que los subindicadores no tienen que estar necesariamente relacionados, ni tener una unidad de medida común, ni tampoco tener cada uno de ellos una importancia relativa obvia que pueda servir de guía en una eventual ponderación de su agrupación en un solo indicador compuesto (Saturno, 2004).

### **3.2.1. Construcción de indicadores compuestos**

A lo largo del proceso de construcción de un indicador compuesto se debe seguir una serie de etapas minuciosas (Soto & Schuschny, 2009). Dichas etapas son:

- Desarrollo de un marco conceptual
- Selección de los indicadores
- Análisis multivariado
- Imputación de datos perdidos
- Normalización de los datos

- Ponderación de la información
- Agregación de la información
- Análisis de robustez y sensibilidad

El desarrollo de un marco es fundamental puesto que sustenta de manera conceptual la generación del indicador compuesto. Es a partir de ese marco que se justifica la construcción del indicador, dando pertinencia y razón de ser a los valores que posteriormente serán analizados. Posteriormente, es necesario evaluar los indicadores que se desea sintetizar. Consiste en la búsqueda de los indicadores que, dentro del marco conceptual definido, puedan ser construidos o utilizados si es que ya existen, para posteriormente ser incorporados en un indicador compuesto. Es fundamental que la selección de los indicadores y variables que compondrán el indicador compuesto sea realizada respetando no sólo los criterios conceptuales, basados en el marco considerado, sino también los estadísticos. La naturaleza subyacente de los datos y la relación que pudiera haber entre ellos deben ser cuidadosamente analizadas antes de proceder a integrar toda la información en un solo indicador. Asimismo, la confiabilidad y la validez son dos características deseables en todo elemento de medición. La confiabilidad o fiabilidad, se refiere a la consistencia o estabilidad de una medida, analizando qué tanto error de medición existe en un instrumento de medición, considerando tanto la varianza sistemática como la varianza por el azar (Kerlinger & Lee, 2002). Dependiendo del grado en que los errores de medición estén presentes en un instrumento de medición, el instrumento será poco o más confiable. A partir de estas consideraciones, se define la confiabilidad como la ausencia relativa de errores de medición en un instrumento de medida. Por su parte, la validez se refiere a que el indicador mida lo que se desea medir. Los indicadores y variables seleccionados para la construcción del indicador compuesto, generalmente estarán medidos en distintas escalas, por lo cual se hace necesario normalizarlos para que puedan ser agregados de manera comparable. Una vez hecho esto, es necesario definir el factor de peso que cada indicador o variable tendrá en la agregación, para finalmente generar el agregado y construir los valores del indicador compuesto. Finalizado el proceso de construcción del indicador compuesto, será necesario presentarlo en un formato claro y entendible, ya sea de manera gráfica o tabular. No se debe descuidar el aspecto de la validación final por medio de un análisis de sensibilidad, consistente en evaluar si pequeñas variaciones en los datos contenidos en los indicadores y variables que se incluyen en la agregación, conducen efectivamente a

pequeñas variaciones en el valor del indicador compuesto, lo cual no está garantizado, pero es requerido como un elemento de robustez.

Por otro lado, es necesario definir algunas condiciones técnicas que *a priori* deberían exigirse en un indicador compuesto (Castro Bonaño, 2002):

- **Existencia y determinación:** La función matemática que define el indicador debe existir y tener solución perfectamente determinada.
- **Exhaustividad:** El indicador compuesto debe ser tal que aproveche al máximo, sin redundancia y en forma útil la información suministrada por los indicadores y variables que lo componen.
- **Monotonía:** El indicador ha de responder positivamente al cambio positivo de las componentes y viceversa. Ello obliga, en algunos casos, a cambiar el signo de las variables que lo componen cuyas correlaciones pudieran estar invertidas.
- **Unicidad:** El indicador compuesto ha de ser único para una situación dada.
- **Invariancia:** El indicador debe ser invariante frente a cambios de origen o de escala de sus componentes.
- **Homogeneidad:** La función matemática que define al indicador compuesto:  $I = f(x_1, \dots, x_p)$  debería ser homogénea de grado 1, es decir debería cumplirse que la expresión 1.

$$f(\alpha \cdot x_1, \dots, \alpha \cdot x_p) = \alpha \cdot f(x_1, \dots, x_p) \quad (1)$$

- **Transitividad:** Si (a), (b) y (c) son tres situaciones distintas que dan lugar a tres indicadores, debería verificarse la expresión 2.

$$\text{Si } I(a) \succ I(b) \text{ e } I(b) \succ I(c) \rightarrow I(a) \succ I(c)$$

(2)

### 3.2.3. Tipos de indicadores compuestos

En función de todas estas características que definen el objetivo del indicador, pueden identificarse diferentes tipos de indicadores compuestos, con métodos de elaboración más o menos complejos, según se describe de forma resumida en la Tabla 16. Tipos de indicadores compuestos Tabla 16 (Saturno, 2004).

Tabla 16. Tipos de indicadores compuestos (Saturno, 2004).

Tipo	Método
1. Sin ponderación de los subindicadores	
1.1 Sin reconversión de escalas de medida de los subindicadores	
1.1.1 Suma de rankings	$\sum_{i=1}^N Rank_i$
1.1.2 Ranking medio	$\sum_{i=1}^N Rank_i / N$
1.1.3 Porcentaje simple	$\frac{\sum \text{cumplimientos de los subindicadores}}{\sum \text{de ocasiones en los que se evalúa cada subindicador}} \times 100$

1.1.4 Media de cumplimientos	$\frac{\sum \text{cumplimientos de los subindicadores}}{N.^{\circ} \text{ de subindicadores evaluados}}$
1.1.5 Porcentaje de 100% de cumplimientos	$\frac{\text{casos en los que se cumplen los subindicadores}}{N.^{\circ} \text{ de subindicadores evaluados}} \times 100$
1.1.6 Suma de número de subindicadores por encima de la media menos número de subindicadores por debajo de la media	$\sum_{i=1}^N \text{sgn} \left[ X_i - \bar{X}_i \right]$
1.2 Con reconversión de escalas de medida de los subindicadores	
1.2.1 Suma de razones o de proporciones de las diferencias con la media	$\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{x_i} \text{ o } \sum_{i=1}^N \frac{x_i - \bar{x}_i}{x_i}$
1.2.2 Suma o media de los valores (absolutos o diferencias con medias) estandarizados	$\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_{x_i}} \text{ o } \sum_{i=1}^N \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_{x_i}}$ solos o promediado a $\sum$ o $N$ en denominador
1.2.3 Suma de valores reconvertidos en función de rango	$\sum_{i=1}^N \frac{x_i - \min(x_i)}{\text{rango}(x_i)}$
2. Con ponderación de los subindicadores	
2.1 Análisis de componentes principales y análisis factorial	Combinaciones de estadísticas de grupos de subindicadores
2.2 Regresión múltiple	Modelos de regresión múltiple con los subindicadores como variables independientes y un indicador de referencia como dependiente
2.3 Neutralización del efecto de las correlaciones entre subindicadores	$\sum_{i=1}^N \left[ 2 \cdot (1 + r_{x_i y_i}) - 1 / 2(x_i + y_i) \right]$
2.4 Distancia a frontera de eficiencia	Ponderación en función de los valores benchmark de la combinación de subindicadores
2.5 Distancia a valores estándar	Ponderación en función de los valores-objetivos o estándar de cada subindicador
2.6 Opinión de expertos (distribución de presupuesto imaginario)	Ponderación según cantidad otorgada a cada subindicador
2.7 Opinión de la población	Ponderación según valor otorgado por consultas estructuradas a la población o sus representantes
2.8 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	Utilización de métodos cuantitativos y cualitativos en comparaciones sucesivas por pares de subindicadores

N: número total de subindicadores; i: serie de subindicadores; x: resultado de la medición de un subindicador; sgn: signos;  $r_{xyi}$ : coeficiente correlación entre 2 subindicadores. Este grupo de métodos no implica necesariamente ponderación, pero también pueden ser utilizados con ponderación previa de los subindicadores, en combinación con alguno de los métodos listados en el apartado 2 de esta tabla.

### 3.2.4. Indicador de productividad y eficiencia

La productividad de una determinada unidad se define como la relación existente entre los resultados que obtiene y los recursos empleados en su producción (ver expresión 3) (Farrell, 1957). Es un índice que sirve para medir cómo se están aprovechando dichos recursos.

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Producción creada}}{\text{Recurso consumido}} = \frac{\text{Salidas}}{\text{Entradas}} = \frac{\text{Suma ponderada de salidas}}{\text{Suma ponderada de entradas}}$$

(3)

Para expresar matemáticamente el índice de productividad se denota como  $x_{ij}$  a la cantidad de entrada o recurso  $i$  utilizado por la unidad  $j$ , y como  $y_{kj}$  a la cantidad de salida o resultado  $k$  que produce la misma unidad. Asimismo, para poder realizar la suma ponderada es necesario adimensionalizar las entradas y las salidas, para lo cual se

utilizan los términos  $u_{ij}$  y  $v_{kj}$  respectivamente, obteniéndose las expresiones de Entrada ( $EV_j$ ), Salida Virtual ( $SV_j$ ) que se muestran en las expresiones 4 y 5, obteniéndose la productividad como  $P_j$  (expresión 6).

$$EV_j = \sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj} \quad (4)$$

$$SV_j = \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

$$P_j = \frac{\sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}} \quad (6)$$

Con esta última ecuación se puede determinar la productividad de una unidad productiva. Sin embargo, lo interesante es tener algún índice que nos permita comparar las unidades con otras similares para poder tener una idea de si el valor de productividad es adecuado o no. Para ello, se introduce el concepto de Eficiencia. Se dice que un sistema u organización es eficiente si puede generar igual salida usando la menor cantidad de entradas posible. De esta forma, la eficiencia de una unidad productiva debe definirse en términos relativos ya que siempre será eficiente o no, respecto a un conjunto de unidades similares, de las cuales se identifica la de mayor productividad. Por lo tanto, el índice de eficiencia de una unidad productiva  $j$  ( $E_j$ ) es un valor comprendido entre 0 y 1 y se define como muestra la expresión 7.

$$E_j = \frac{\text{Productividad}_j}{\text{Productividad}_{\max}} = \frac{\text{Salida Virtual}_j / \text{Entrada Virtual}_j}{\text{Salida Virtual}_{\max} / \text{Entrada Virtual}_{\max}} \quad (7)$$

### 3.3. DEA

DEA es una metodología basada en modelos de programación lineal, propuesta por primera vez en 1978 por Charnes, Cooper y Rhodes (CCR), para estudiar la eficiencia relativa de una serie de unidades similares. Estas unidades o sistemas similares son denominados unidades homogéneas de toma de decisión, DMU (por sus siglas en inglés Decision Making Units) que utilizan entradas o *inputs* para producir salidas u *outputs*. De esta forma, las DMU más eficientes serán aquellas que maximicen la relación *output/input* (Dyson, 2001). Cabe destacar que dicha relación puede maximizarse si aumentan los *outputs* o disminuyen los *inputs*.

### 3.3.1. Características y metodología

Para aplicar la metodología DEA en primer lugar se requiere identificar el conjunto de posibilidades de producción del problema, es decir, definir los posibles puntos de operación. Las dos alternativas más frecuentes son las tecnologías denominadas Retornos de Escala Constante (Constant Return to Scale, CRS) y Retornos de Escala Variable (Variable Return to Scale, VRS). La tecnología CRS considera como unidad admisible dentro del problema cualquier combinación lineal de las DMU's observadas, mientras que en la tecnología VRS sólo se consideran admisibles las combinaciones lineales convexas. De esta manera, las medidas de eficiencia se definen como Eficiencia Técnica Global (ETG), a aquella que refleja la habilidad del sistema de obtener el máximo nivel de producción dados ciertos niveles en el uso de los recursos o factores. Dicha ETG se descompone en dos medidas que ayudan a explicar las posibles causas de ineficiencias (expresión 8).

$$ETG=ETP*EE \quad (8)$$

- Eficiencia Técnica Pura (ETP): Se calcula con el modelo BCC ya que se consideran rendimientos variables de escala.
- Eficiencia de Escala (EE): se manifiesta según la naturaleza de los rendimientos a escala con que opera el sistema. Es el resultado del cociente de los coeficientes de eficiencia calculados con el modelo CRS y el modelo VRS (expresión 9). Si existen diferencias entre las dos mediciones de eficiencia para cada DMU, significa que dicha DMU posee ineficiencia de escala.

$$EE=ETG/ETP \quad (9)$$

En segundo lugar, debe seleccionarse el modelo DEA adecuado al problema a resolver. Existen multitud de modelos DEA, todos ellos con el objetivo de encontrar un punto admisible de mayor productividad con el que puedan compararse las diferentes DMU's del problema. De esta forma, dada una cierta DMU<sub>0</sub>, se formula un modelo de programación lineal que busca una combinación lineal (convexa en el caso VRS) de las DMU's existentes, definiendo de esta forma un conjunto de puntos tecnológicamente admisibles que usan menos *inputs* que la DMU<sub>0</sub> y/o producen más *outputs* que la DMU<sub>0</sub>.

Si ningún punto domina a la DMU<sub>0</sub>, entonces se le denomina unidad eficiente (de escala en el caso CRS, y técnicamente eficiente en el caso de VRS). Cuando una unidad domina a otra es porque tiene menos *inputs* y/o más *outputs* en la tecnología considerada. Si por el contrario la DMU<sub>0</sub> no es eficiente, el modelo la proyecta sobre la frontera eficiente y

mide la eficiencia de la  $DMU_0$  en términos de reducción del consumo de *inputs* e incremento en la producción de *outputs*. Hay diferentes maneras de realizar la proyección y medición de la distancia entre la  $DMU_0$  y el punto sobre el que se proyecta. Así, la orientación al *input* consiste en la reducción tanto como sea posible de todos los recursos de forma equi-proporcional sin reducir los *outputs*. Por otra parte, la orientación al *output* consiste en incrementar tanto como sea posible los productos de forma equi-proporcional sin un incremento del *input*. Existen modelos no radiales con orientación al *input* u *output* así como modelos con orientación de *input-output* que intentan conseguir tanto reducción de recursos como incrementos de productos.

La resolución de la técnica DEA se basa en un modelo de programación lineal no paramétrica que arroja como resultado un valor, normalmente llamado  $\theta$ , el cual si es igual a 1 significa que la  $DMU_0$  evaluada es eficiente en relación con las otras  $DMU$ , puesto que no es posible encontrar ninguna  $DMU$  o combinación lineal de  $DMU$  que obtenga al menos el *output* de la  $DMU_0$  utilizando menos factores (hablando de un modelo orientado al *input*). En caso contrario, si  $\theta < 1$  la  $DMU_0$  será ineficiente. Análogamente, orientando el modelo al *output*, será eficiente para  $\theta = 1$  e ineficiente para  $\theta > 1$ . Considerando la Figura 21, se identifican cuatro  $DMU$  (A, B, C y D) cada una de las cuales obtiene un único *output* ( $y$ ) empleando para ello dos *inputs* ( $x_1, x_2$ ). En la misma, se muestra el “plan de producción” ( $x_1/y, x_2/y$ ) para cada una de las referidas  $DMU$ . La isocuanta unidad de las  $DMU$  eficientes viene representada por la curva  $I I'$ , de tal modo que aquellas que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes. Así, la eficiencia técnica que pone de manifiesto la capacidad que tiene una  $DMU$  para obtener el máximo *output* a partir de un conjunto dado de *inputs*, se obtiene al comparar el valor observado de cada  $DMU$  con el valor óptimo que viene definido por la frontera de producción estimada (isocuanta eficiente). Observando la misma figura puede verse que tanto la unidad B como la D son ineficientes técnicamente, puesto que ambas podrían reducir la cantidad de *inputs* consumidos y seguir produciendo una unidad de *output*. La ineficiencia de estas  $DMU$  vendrá dada por la distancia  $B'B$  y  $D'D$ , respectivamente. Por el contrario, las unidades A y C son técnicamente eficientes puesto que operan sobre la isocuanta eficiente.

Cuando una  $DMU$  obtiene el valor  $\theta = 1$  se dice que posee una eficiencia de Farrell. Sin embargo, puede ocurrir que en la resolución aparezcan variables residuales o de holgura que indiquen que hay presencia de *inputs* u *outputs* que podrían reducirse o

incrementarse, respectivamente. En dicho caso, se denomina eficiencia de Pareto-Koopmans (P-K) cuando la DMU presenta  $\theta=1$  y holguras iguales a cero, e ineficiencia cuando  $\theta < 1$  y holguras distintas de cero. En la Figura 22, donde se consideran dos *inputs* ( $x_1, x_2$ ) y un *output* ( $y$ ), se pretende reflejar la situación descrita anteriormente. Las DMU etiquetadas como A, B, C y D son eficientes técnicamente según la condición de eficiencia de Farrell, puesto que su puntuación de eficiencia es igual a uno. La DMU E es ineficiente ( $\theta < 1$ ). Por otro lado, sólo las DMU B y C son eficientes técnicamente según la condición de P-K, ya que tanto la DMU A como la DMU D presentan holguras. La primera en el *input*  $x_2$  y la segunda en el *input*  $x_1$ , que indicarán en cuánto las unidades A y D deberían reducir el consumo de dichos *inputs*. Ninguna DMU presenta holgura en el *output*.

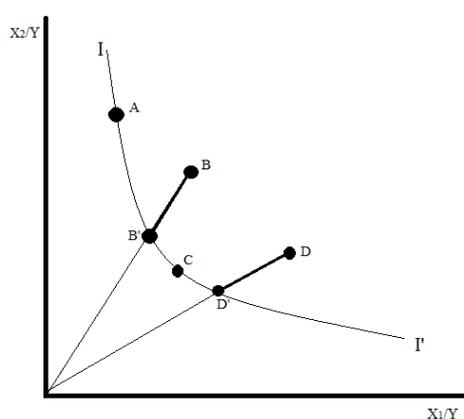


Figura 21. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes.

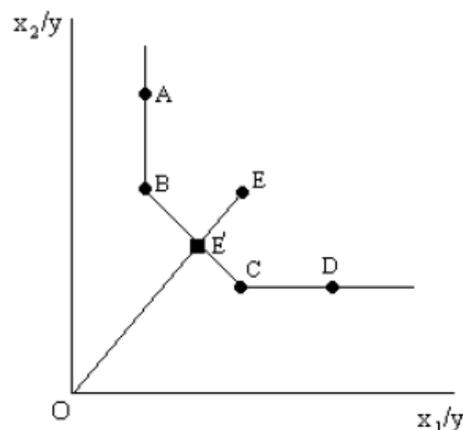


Figura 22. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes considerando holguras.

### 3.3.2. Desarrollo de los modelos matemáticos DEA

Se consideran  $n$  DMUs para evaluar la eficiencia. Cada DMU consume  $m$  inputs diferentes para producir  $s$  outputs también diferentes. La nomenclatura analítica utilizada es la siguiente (Tabla 17):

Tabla 17. Nomenclatura utilizada en los modelos DEA

Nomenclatura	Descripción
$j = 1, 2, \dots, n$	Subíndice para las DMUs
$i = 1, 2, \dots, m$	Subíndice para los <i>inputs</i>
$k = 1, 2, \dots, r$	Subíndice para los <i>outputs</i>
$X_{ij}$	Cantidad de <i>input</i> $i$ consumida por DMU $_j$
$Y_{kj}$	Cantidad de <i>output</i> $k$ producida por DMU $_j$
$\varepsilon$	Es una constante no arquimediana (menor que cualquier número real positivo). Debido a ello, en las restricciones donde aparece, se les obliga a los pesos a que nunca puedan ser nulos.
$J$	Variable que está en estudio.
$u_i, v_k$	Son los pesos o multiplicadores de los productos e insumos respectivamente.

$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj}$	Es la suma ponderada de los productos y se conoce como producto virtual.
$\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}$	Es la suma ponderada de los insumos y se conoce como insumo virtual.

A continuación, se muestran los modelos denominados CCR-Input, CCR-Output, BCC-Input y BCC-output.

### 3.3.3. Modelo CCR-Input.

Las siglas CCR se corresponden con las iniciales de los autores que lo propusieron: Abraham Charnes, William W. Cooper y Edward Rhodes. En los modelos que operan con retornos de escala constantes las unidades toman como DMU's de referencia las de mayor productividad de entre las observadas a la hora de calcular su eficiencia relativa, y por tanto, todas las DMU<sub>j</sub> analizadas consideran a las mismas unidades como eficientes. A continuación, se exponen 2 de estos modelos: el modelo CCR-INPUT y el modelo CCR-OUTPUT.

Como se dijo anteriormente, maximizar el índice de eficiencia puede hacerse haciendo máximo su numerador manteniendo su denominador constante. Ese es el objetivo del modelo de programación lineal CCR orientado al *Input*, el cual es expuesto en las expresiones 10 a 13, en su forma multiplicativa (derivada de la liberalización de la forma ratio).

Como puede observarse, se consigue un modelo de programación lineal con  $(n + 1)$  restricciones y  $(s + m)$  cotas. La función objetivo, dada por la expresión 10, busca maximizar los pesos de los outputs de forma que se maximice la eficiencia dejando los outputs constantes. Las  $n$  primeras restricciones (expresión 11) provienen de linealizar la condición de que todas las unidades deben tener una eficiencia menor o igual que uno. Es decir, cada vez que el modelo trata de imponer los pesos que garanticen una eficiencia grande, debe asegurarse al mismo tiempo de que ninguna DMU del problema tenga una eficiencia inadmisibile (mayor que uno). Por la construcción del modelo, si la unidad no consigue ser eficiente, aun eligiendo los mejores pesos posibles para ello, es que existe otra que con esos pesos ya lo es.

$$MAX \left[ \sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} \right] \quad (10)$$

s.a :

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} - \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} \leq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} = 1 \quad (12)$$

$$v_{kj} \geq \varepsilon ; u_{ij} \geq \varepsilon \quad (13)$$

La restricción adicional (expresión 12) establece una medida de referencia del *input* virtual. Así, se asegura que se maximiza la eficiencia cuando se hacen máximos los *outputs*. De esta forma, no sólo se consigue que el valor de la función objetivo, cuando se resuelve el problema, sea la eficiencia de la unidad DMU<sub>j</sub>, sino que además se reduce el número de soluciones alternativas de los pesos. Por último, las expresiones en 13, establecen que los pesos deben ser mayores que un número arbitrariamente pequeño y positivo, evitando que sean nulos.

Sin embargo, es más frecuente utilizar el modelo dual asociado ya que utiliza un menor número de restricciones, dado por s+m. El problema dual o de forma envolvente se expone a continuación con las expresiones 14 a 18.

$$MIN \theta_j \quad (14)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ij} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{kj} \geq y_{kj} \quad (16)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (17)$$

$$\theta_j \text{ libre} \quad (18)$$

-  $\lambda_j$  es el peso o intensidad de la DMU<sub>j</sub>.

-  $\theta$  denota la puntuación de eficiencia (técnica) de la DMU<sub>j</sub>.

La función objetivo dada por la expresión 14, determinará el valor de eficiencia buscando ser igual a 1 para cada DMU. Recordando que existe una variable dual por cada restricción primal y una restricción dual por cada variable primal, las restricciones 15 y 16, muestran la forma dual de las variables  $u_i$  y  $v_k$ .

Para cada DMU ineficiente es posible construir una Unidad (real o ficticia) situada sobre la frontera eficiente. Tal Unidad es construida a partir de una o más DMU eficientes, denominadas conjunto de referencia; concretamente por aquel/aquellas que en la

evaluación de eficiencia han obtenido valores  $\lambda_j > 0$ . Las coordenadas de la proyección sobre la frontera representarán el plan de proyección (valores objetivos) que convertiría a la DMU ineficiente en eficiente.

Así, se obtiene el conjunto de referencia y la intensidad ( $\lambda_j$ ) con la que cada DMU eficiente (benchmark) que lo forma interviene en la construcción, para cada DMU ineficiente, de la respectiva Unidad (real o ficticia) eficiente

### 3.3.4. Modelo CCR-Output.

Si se linealiza la función objetivo del modelo RATIO minimizando el denominador de la expresión y manteniendo el numerador constante, se obtiene un modelo lineal similar al anterior (expresiones de 19 a 22).

$$MIN \left[ \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} \right] \quad (19)$$

s.a :

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} - \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} \leq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} = 1 \quad (21)$$

$$v_{kj} \geq \varepsilon ; u_{ij} \geq \varepsilon \quad (22)$$

Donde la función objetivo representa ahora el inverso de la eficiencia relativa de la unidad  $J$ , y por tanto siempre será mayor o igual que uno (expresión 19). Las  $n$  primeras restricciones (expresión 20) provienen de linealizar la condición de que todas las unidades deben tener una eficiencia mayor o igual que uno. La restricción 21 establece una medida de referencia del *output* virtual. Es un problema con retornos de escala constantes, por la razón ya expuesta. El modelo envolvente se muestra a continuación en las expresiones 23 a 27. La función objetivo de la expresión 23, deja libre la maximización de  $\phi$ , el cual buscará alcanzar el valor 1. Las expresiones 24 y 25,

$$MAX \quad \phi \quad (23)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{iJ} \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{kj} \geq \phi y_{kJ} \quad (25)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (26)$$

$$\phi \text{ libre} \quad (27)$$

representa la forma dual de las variables del problema primal, y la expresión 26 establece que los pesos sean mayores o iguales a cero.

### 3.3.5. Modelo BCC-Input.

BCC se corresponde con las iniciales de sus autores Rajiv D. Banker, Abraham Charnes y William W. Cooper, fue propuesto por primera vez en 1984. Para que el modelo considere los retornos de escala variables, debe introducirse alguna restricción que le indique al modelo que cada  $DMU_j$  tiene que ser comparada con aquellas de su tamaño y no con todas las unidades presentes en el problema. Modificando la forma multiplicativa del modelo CCR-INPUT se obtienen las expresiones 28 a 33 para el modelo primal.

$$MAX \left[ \sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} + v_j \right] \quad (28)$$

s.a :

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} - \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} + v_j \leq 0 \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} = 1 \quad (30)$$

$$v_{kj} \geq \varepsilon ; u_{ij} \geq \varepsilon \quad (31)$$

$$v_j \leq 0, \text{ si hay rendimientos no-crecientes} \quad (32)$$

$$v_j \geq 0, \text{ si hay rendimientos no-decrecientes} \quad (33)$$

Modificando el modelo primal anterior, se obtiene el modelo dual mostrado en las expresiones 34 a 39. Se puede observar que la restricción adicional que aparece en el dual de este modelo (número 37) obliga a que la proyección de la unidad se efectúe sobre el hiperplano que forman las unidades más productivas de su tamaño. En general, para este caso, aparecerán unidades que no eran eficientes en el anterior modelo (retornos de escala constantes) y que sin embargo en este modelo sí lo son. De ahí que la frontera eficiente, esté formada por más unidades que en el modelo CCR.

$$MIN \theta_j \quad (34)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ij} \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{kj} \geq y_{kj} \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (37)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (38)$$

$$\theta_j \text{ libre} \quad (39)$$

### 3.3.6. Modelo BCC-Output

Análogamente a los modelos expuestos anteriormente, el modelo primal BCC-Output se presenta en las expresiones 40 a 43.

$$MIN \left[ \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} + u_j \right] \quad (40)$$

s.a :

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} - \sum_{i=1}^m (u_{ij} x_{ij} + u_j) \leq 0 \quad (41)$$

$$\sum_{k=1}^r v_{kj} y_{kj} = 1 \quad (42)$$

$$v_{kj} \geq \varepsilon ; u_{ij} \geq \varepsilon \quad (43)$$

El modelo envolvente BCC-Output se presenta a continuación en las expresiones 44 a 49.

$$MAX \quad \phi \quad (44)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} \quad (45)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{kj} \geq \phi y_{k0} \quad (46)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (47)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (48)$$

$$\phi \text{ libre} \quad (49)$$

### 3.3.7. Rendimientos de escala con DEA

Para evaluar la eficiencia de un conjunto de Unidades es necesario identificar la tipología de los rendimientos a escala que caracteriza la tecnología de producción. El rendimiento de escala es un concepto que refleja el grado en el que un aumento proporcional de todos los inputs incrementara los outputs. Existen situaciones donde factores como competencia imperfecta, restricciones en las finanzas, entre otros, impiden que una unidad opere con rendimientos de escala constantes. Por lo que, aumentos proporcionales en los inputs, pueden no resultar en aumentos proporcionales en los outputs.

Los rendimientos a escala, que indican incrementos de la producción como resultado del incremento de todos los factores de producción en el mismo porcentaje, pueden ser constantes, crecientes o decrecientes. A continuación, se describen cada uno de ellos.

- Rendimientos constantes a escala (CRS, por sus siglas en inglés): cuando el incremento porcentual del *Output* es igual al incremento porcentual de los recursos productivos (*Inputs*).
- Rendimientos variables a escala (VRS, por sus siglas en inglés), pueden ser:
  - Rendimientos crecientes a escala (IRS, por sus siglas en inglés): se dice que la tecnología exhibe este tipo de rendimientos cuando el incremento porcentual del *Output* es mayor que el incremento porcentual de los inputs. Por ejemplo, en una nueva organización podría darse que el personal no se encuentre lo suficientemente entrenado, pero con el correr de los días, el rendimiento será a escala creciente, con forme aumente la capacitación y entrenamiento de los mismos.
  - Rendimientos decrecientes a escala (DRS, por sus siglas en inglés): cuando el incremento porcentual del *Output* es menor que el incremento porcentual de los *Inputs*. Por ejemplo, una unidad puede haber crecido mucho en poco tiempo, resultando en que la gerencia no consiga controlar todos los aspectos productivos y organizacionales, significando un crecimiento a escala decreciente.

Para el caso de un único *input* y un único *output*, en la Figura 23 se muestran 6 DMUs (A, B, C, D, H y M) y las fronteras de eficiencias obtenidas bajos los modelos CCR y BCC. Como puede observarse en el gráfico, las DMU B y C resultaron eficientes en el modelo CCR (el cual considera CRS), mientras que A y D en el modelo BCC (el cual considera VRS). Dadas las características de la curva, se identifica que A opera en IRS mientras que D lo hace en DRS. Por su parte, la DMU M, es ineficiente en rendimientos variables, presentando DRS por ubicarse en dicha zona. En el caso de la DMU H, que ha resultado ineficiente en ambos modelos, tendrá rendimientos crecientes o decrecientes dependiendo la orientación del modelo pretendido. Esto es, si el modelo es al input, la proyección es hacia H', la cual se encuentra en la región IRS, mientras que, si es hacia el output, la proyección es hacia H\* y por lo tanto presentará DRS.

### 3.3.8. Modelos DEA IRS y DEA DRS

A partir del modelo BCC se modifica la restricción  $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$  para obtener modelos que determinen las DMUs eficientes en espacios de rendimientos creciente y decreciente.

Transformando dicha restricción a  $\sum_{j=1}^n \lambda_j \leq 1$ , se obtiene el modelo DEA-DRS que capturará las DMUs ineficientes por rendimientos decrecientes como se muestra en la Figura 24.

Análogamente, si la restricción se transforma en  $\sum_{j=1}^n \lambda_j \geq 1$  se obtiene el modelo DEA IRS que capturará las DMUs de rendimientos crecientes a escala (Figura 25).

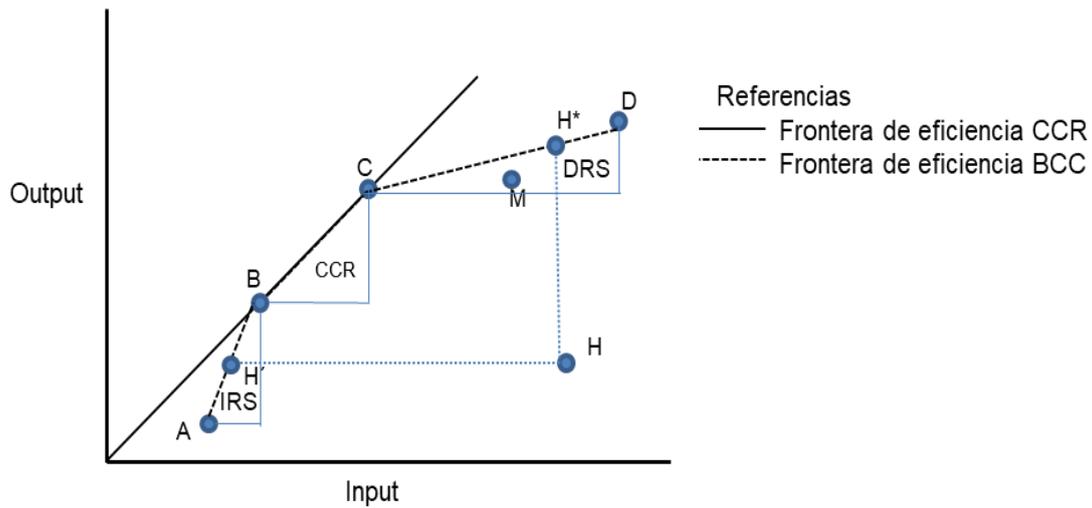


Figura 23. Gráfico de DMUs eficientes e ineficientes de escala en DEA

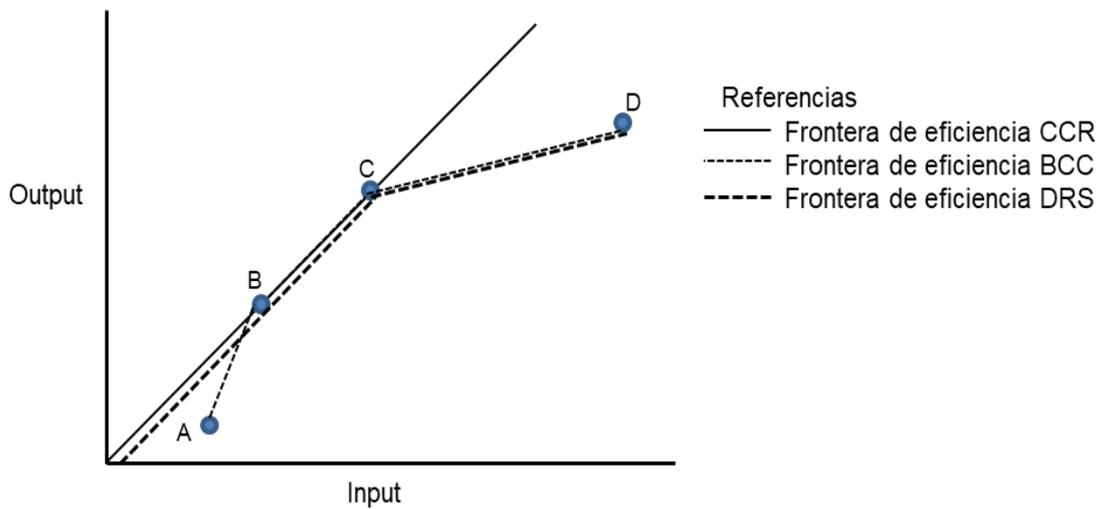


Figura 24. Gráfico de fronteras de eficiencia CCR, BCC y DRS.

Al extenderse el análisis de eficiencia considerando numerosos inputs y/o outputs, la identificación de los rendimientos de las DMUs no resulta tan sencillo como se presentó previamente. En Ramanathan (2003) se explican tres métodos para analizar la naturaleza de los rendimientos de las DMUs. El primero utiliza los valores óptimos de  $\lambda$  cuando se resuelve el modelo CCR, considerando la  $DMU^*$  en cuestión, como la DMU de referencia. En cada caso se analiza:

- Si  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^* = 1$ , entonces la  $DMU^*$  de referencia tendrá rendimientos constantes de escala
- Si  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^* > 1$ , la  $DMU^*$  presenta rendimientos crecientes de escala.
- Si  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^* < 1$ , la  $DMU^*$  presenta rendimientos decrecientes de escala.

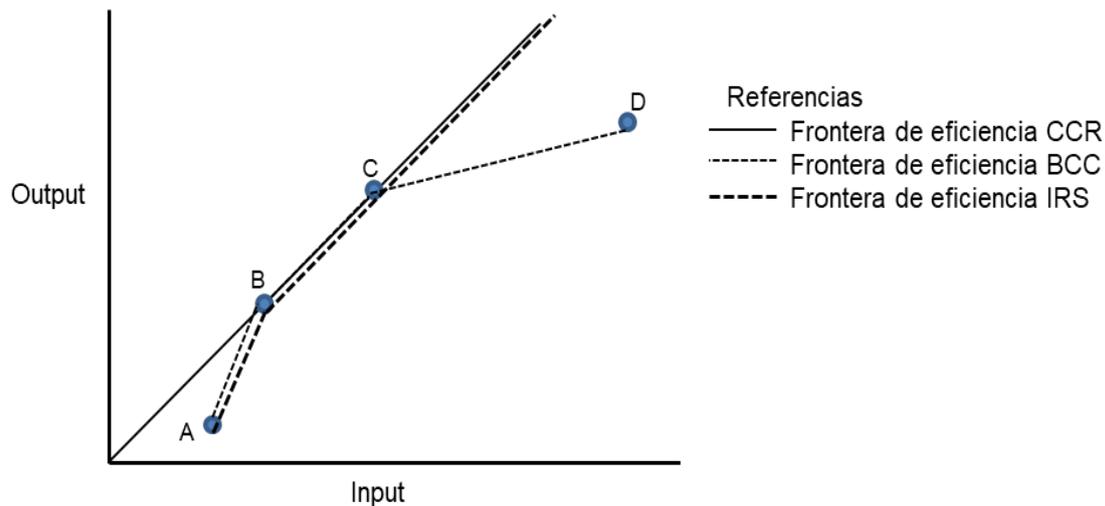


Figura 25. Gráfico de fronteras de eficiencia CCR, BCC y IRS.

El segundo método, usa los valores  $v_o$  obtenidos en la versión multiplicativa del modelo BCC. En cada caso se analiza:

- Si  $v_o^* = 0$ , DMU\* presenta rendimientos constantes de escala.
- Si  $v_o^* > 0$ , DMU\* presenta rendimientos crecientes de escala.
- Si  $v_o^* < 0$ , DMU\* presenta rendimientos decrecientes de escala.

Sin embargo, estas pruebas fallan cuando los modelos DEA obtienen resultados óptimos múltiples (Seiford & Joe, 1999). Ante ello, el tercer método presentado, es robusto contra resultados de múltiples óptimos. En el mismo se deben resolver tres modelos DEA y analizar los resultados según los pasos explicados a continuación:

Suponiendo orientación al input ( $\theta \leq 1$ )

1. Resolver DEA CCR obteniendo un valor de eficiencia  $\theta = p$  para la DMU\* de referencia.
2. Resolver DEA BCC, obteniendo un valor de eficiencia  $\theta = q$  para DMU\*. Luego, si  $p = q$ , entonces, DMU\* presenta CRS.
3. Si  $p \neq q$ , resolver el modelo IRS, obteniendo un valor de eficiencia  $\theta = r$  para la DMU\*. Luego, si  $r = q$  la DMU\* presenta IRS; si  $r < q$ , la DMU\* presenta DRS.

Si se consideran modelos con orientación al output, los pasos 1 y 2 son idénticos a los mencionados previamente y luego, dado que se obtienen valores de  $\theta \geq 1$ , el paso 3 resulta en:

3. Si  $p \neq q$ , resolver el modelo IRS, obteniendo un valor de eficiencia  $\theta = r$  para la DMU\*. Luego, si  $r = q$  la DMU\* presenta IRS; si  $r > q$ , la DMU\* presenta DRS.

### 3.3.9. Tratamiento de las holguras

Como se mencionó anteriormente, según el criterio de P-K, aunque una DMU obtenga un valor de  $\theta=1$ , la misma puede ser ineficiente dado por la existencia de holguras. En los modelos previamente expuestos, las holguras no son tenidas en cuenta, y por lo tanto se obtienen sólo eficiencias de Farrel o también llamada, eficiencia débil. Para evitar la existencia de la misma, se plantea una segunda etapa la cual consiste en encontrar una solución que maximice la suma de excesos en las entradas y faltantes en las salidas (expresión 50), mientras se mantiene fijo  $\theta= \theta^*$ . El programa lineal de rendimientos constantes que se plantea es el constituido por las expresiones 50 a 53.

En esta segunda fase, una DMU es llamada CCR eficiente (eficiencia técnica y eficiencia de escala), si una solución óptima  $(\theta^*, \lambda^*, s_i^-, s_r^+)$  de las dos fases anteriores satisface que  $\theta^* = 1$  y todas las holguras son cero ( $s_i^- = s_r^+ = 0$ ), de lo contrario la DMU es ineficiente.

$$MAX \left[ \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{k=1}^r s_k^- \right] \quad (50)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = \theta^* x_{i0} \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{r0} \quad (52)$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0, \quad \forall i, j, r \quad (53)$$

El problema dual, al que se refiere como forma envolvente, expresado como un modelo único a resolver en un modelo de dos etapas es el mostrado en la expresiones 54 a 57.

$$MIN \quad \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{k=1}^r s_k^- \right) \quad (54)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = \theta^* x_{i0} \quad (55)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{r0} \quad (56)$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0, \quad \forall i, j, r \quad (57)$$

Para el caso de rendimientos de escala variable, el modelo se muestra en las expresiones 58 a 62.

$$MIN \quad \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{k=1}^r s_k^- \right) \quad (58)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = \theta^* x_{i0} \quad (59)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{r0} \quad (60)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (61)$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0, \quad \forall i, j, r \quad (62)$$

### 3.3.10. Modelos con inputs acotados

En ciertas ocasiones, como la que se trabajará en el capítulo 5 de la presente Tesis, los inputs y/o los outputs deben estar acotados. Es decir, un input no puede reducirse más que cierto valor, y un output no puede superar determinada cota. Con dicha consideración, los modelos DEA deben incorporar restricciones que tengan en cuenta lo mencionado. Suponiendo  $\underline{x}_i$  como cota inferior de los inputs  $i$ , e  $\bar{y}_r$  cota superior de los outputs  $r$ , el último modelo planteado queda expresado de la siguiente manera (expresiones 63 a 69).

$$MIN \quad \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{k=1}^r s_k^- \right) \quad (63)$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = \theta^* x_{i0} \quad (64)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{r0} \quad (65)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \geq \underline{x}_i \quad (66)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ \leq \bar{y}_r \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (68)$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \quad ; \quad \forall i, j, r \quad (69)$$

## 3.4. Regresión Lineal

El análisis de regresión lineal (RL) es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables.

### 3.4.1. Características y metodología

Tanto en el caso de dos variables (regresión *simple*) como en el de más de dos variables (regresión *múltiple*), el análisis de regresión lineal puede utilizarse para explorar y

cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente o criterio ( $Y$ ) y una o más variables llamadas independientes o predictoras ( $X_1, X_2, \dots, X_k$ ), así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos. Además, el análisis de regresión lleva asociados una serie de procedimientos de diagnóstico (análisis de los residuos, puntos de influencia) que informan sobre la estabilidad e idoneidad del análisis y que proporcionan pistas sobre cómo perfeccionarlo. El objetivo final de una RL es encontrar los coeficientes  $a_k$  y  $b$  de la recta que describan la relación entre las variables de estudio, como se muestra en la ecuación 70.

$$Y = a_k X_k + b \quad (70)$$

El coeficiente  $b$  es el origen de la recta de regresión, mientras que  $a_k$ , es la pendiente de la recta de regresión e indica el cambio medio que corresponde a la variable dependiente por cada unidad de cambio de la variable independiente. Los mismos se obtienen a partir de las siguientes fórmulas (71, 72 y 73), donde el subíndice  $k$  refiere a las distintas variables independientes consideradas e  $i$  a los valores  $X$  e  $Y$  de la muestra de tamaño  $n$  utilizados para el análisis.

$$b = \bar{Y} - a\bar{X} \quad (71)$$

$$a_k = \frac{\sum X_i^k Y_i - \sum X_i^k \sum Y_i}{n \sum X_i^{k2} - (\sum X_i^k)^2} \quad (72)$$

$$e_i = Y_i - Y_i^* \quad (73)$$

Otro concepto importante a tener en cuenta en RL es la definición de Residuo ( $e_i$ ): los residuos son las diferencias entre los valores observados ( $Y_i$ ) y los pronosticados con la recta de RL ( $Y_i^*$ ) e informan sobre el grado de exactitud de los pronósticos ya que cuanto más pequeño es el error típico de los residuos mejores son los pronósticos, o lo que es lo mismo, mejor se ajusta la recta de regresión a la nube de puntos. Asimismo, el análisis de las características de los casos con residuos grandes (sean positivos o negativos) puede ayudar a detectar casos atípicos y, consecuentemente, a perfeccionar la ecuación de regresión a través de un estudio detallado de los mismos.

### 3.4.2. Supuestos del modelo de regresión lineal

Al efectuar las aplicaciones prácticas del modelo de RL, por tratarse de un modelo estadístico, hay una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo y son necesarios corroborar. Estos son:

- **Linealidad:** la relación entre las variables independientes y la dependiente debe ser lineal. Esta información puede obtenerse a partir de una inspección del diagrama de dispersión.
- **Independencia.** Los residuos tienen que ser independientes entre sí, es decir, los residuos constituyen una variable aleatoria. Para ello se realiza el estadístico de Durbin-Watson (DW) (Durbin & Watson, 1951) dado por la expresión 74.

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (74)$$

El mismo oscila entre 0 y 4, y toma el valor 2 cuando los residuos son independientes. Los valores menores que 2 indican autocorrelación positiva y los mayores que 2 autocorrelación negativa. Puede asumirse independencia entre los residuos cuando DW toma valores entre 1,5 y 2,5.

- **Homocedasticidad.** Para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de las variables independientes), la varianza de los residuos debe ser constante, es decir, que el tamaño de los residuos es independiente del tamaño de los pronósticos. Para observar esta condición se realiza un análisis ANOVA, el cual tiene un *p-valor* asignado que sirve de comparación con el nivel de significancia establecido, para luego aceptar o rechazar la hipótesis de homogeneidad de las varianzas (las varianzas serán homogéneas si el *p-valor* es menor que 0,005).
- **Normalidad.** Para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de las variables independientes), los residuos se deben distribuir normalmente con media cero. Para muestras menores a 50 unidades, este supuesto puede corroborarse con el test de Shapiro-Wilk (SW) (Shapiro & Wilk, 1965). En este se plantea como hipótesis nula que una muestra de tamaño *n* proviene de una población normalmente distribuida. De esta forma, si el *p-valor* obtenido por el test es menor que nivel de significancia establecido (0,005 o 0,01) entonces la hipótesis nula es rechazada y se concluye que los datos no vienen de una distribución normal. Si el *p-valor* es mayor, se concluye que no se puede rechazar dicha hipótesis.
- **No-colinealidad.** Para regresión múltiple, no debe existir relación lineal exacta entre ninguna de las variables independientes, es decir, el valor de correlación debe ser bajo.

En aquellos casos donde algunos de estos supuestos no son superados, suelen realizarse transformaciones de las variables para analizar si puede o no cumplirse las condiciones. Pueden ser transformaciones logarítmicas, exponenciales, de raíz cuadrada, entre otras.

### 3.4.3. Método de selección de variables

Existen diferentes métodos para seleccionar las variables independientes que debe incluir un modelo de regresión, pero los que mayor aceptación han recibido son los métodos de selección por pasos (*stepwise*) (Merino & Ruiz Díaz, 2005). Con estos métodos, se selecciona en primer lugar la mejor variable (siempre de acuerdo con algún criterio estadístico), a continuación, la mejor de las restantes, y así sucesivamente hasta que ya no quedan variables que cumplan los criterios de selección. En particular, se utilizará el método de Pasos Sucesivos el cual consiste, en primer lugar, en seleccionar la variable independiente que, supera los criterios de entrada (si su coeficiente de regresión parcial es significativamente distinto de cero al 5 %) y aquella que más alto correlaciona (en valor absoluto) con la variable dependiente. A continuación, se selecciona la variable independiente que, además de superar los criterios de entrada, posee el coeficiente de correlación parcial más alto (en valor absoluto). Cada vez que se incorpora una nueva variable al modelo, las variables previamente seleccionadas son evaluadas nuevamente para determinar si siguen cumpliendo o no los criterios de salida (si el coeficiente de regresión parcial deja de ser significativamente distinto de cero al 10 %). Si alguna variable seleccionada cumple los criterios de salida, es eliminada del modelo. El proceso se detiene cuando no quedan variables que superen los criterios de entrada y las variables seleccionadas no cumplen los criterios de salida.

### 3.4.4. Bondad de ajuste

Para responder a la pregunta ¿qué tan bien se ajusta la recta de RL estimada a los valores analizados? Se analizarán los siguientes coeficientes:

- **R**: corresponde al coeficiente de correlación de Pearson (Pearson, 1897), el cual mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Varía de -1 a 1, indicando correlación perfectamente positiva o negativa si alcanza los extremos del intervalo. Por el contrario, no hay relación lineal si  $R=0$ .
- **R<sup>2</sup>**: coeficiente de determinación, es el cuadrado del coeficiente de Pearson, varía entre 0 y 1, indicando que el modelo se ajusta muy bien a los datos cuanto más próximo a 1 resulte.
- **ETE**: Error típico de la estimación. Representa la desviación típica de los residuos y está dada por la expresión 75.

$$ETE = \sqrt{\sum (Y_i - Y_i^*)^2 / (n - 2)} \quad (75)$$

### 3.5. Redes Neuronales

Las RNAs son sistemas de procesamiento de la información cuya estructura y funcionamiento están inspirados en las redes neuronales biológicas como estructura fisiológica capaz de procesar información y aprender de ella.

#### 3.5.1. Características y metodologías

El objetivo principal y la mayor utilidad de las RNAs se da en la aproximación de funciones a partir de datos cuyo proceso generador es desconocido y/o presenta no linealidades. La idea básica de funcionamiento de las RNAs se representa en el esquema de la Figura 26. Una RNA se compone de un conjunto de procesadores simples altamente interconectados, denominados nodos, neuronas, unidades o elementos de proceso, los cuáles se organizan en grupos, llamados capas, que permiten la conexión con el exterior y el procesamiento de información (Olmeda, et al., 2002). Generalmente, una RNA típica está compuesta por tres capas:

- Capa de Entrada, mediante la que se presentan los datos a la red. Está formada por nodos de entrada que reciben la información directamente del exterior del sistema.
- Capas Intermedias, encargadas de procesar la información. Se interponen entre las capas de entrada y salida, sin tener conexión con el exterior. En el esquema de la Figura 26 se observa una red multicapa, debido a que posee más de una capa intermedia, sin embargo también existen redes monocapa.
- Capa de Salida, la cual representa la respuesta de la red a una entrada dada, siendo esta información transferida al exterior.

Cada una de las capas contendrá un número determinado de neuronas en función del tipo concreto de red, de la información a procesar, del diseño decidido por el analista y del tipo de trabajo que vaya a realizar la red. Todas las neuronas que contiene una capa se conectan con todas las neuronas de la siguiente capa (según el tipo de RNA las neuronas también pueden conectarse con neuronas de la capa anterior *-feedback-*, o consigo mismas *-autorrecurrentes-*). De esta manera, cuando una neurona obtiene un resultado, lo envía a todas las neuronas de la capa siguiente.

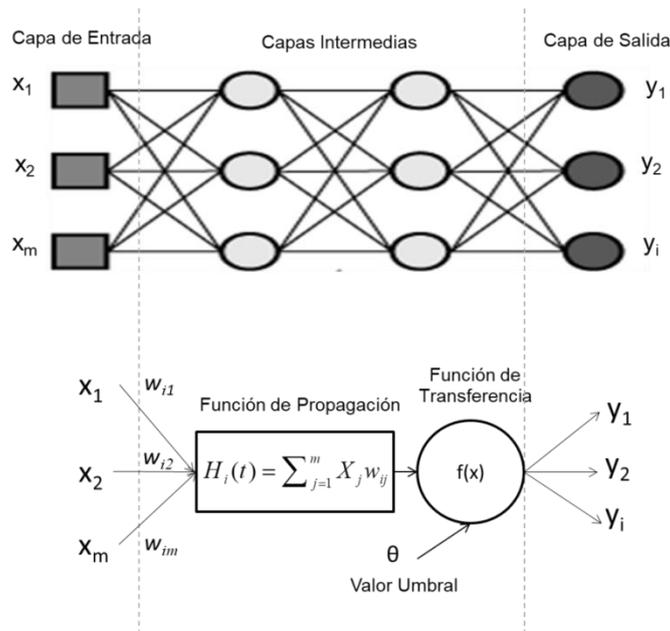


Figura 26. Composición y metodología de funcionamiento general de una RNA.

Este flujo de información estará ponderado por un peso sináptico  $w_{ij}$ , indicando en  $i$  a la neurona de precedencia y  $j$  a la neurona de destino. Al llegar a una neurona todos los datos de las informaciones ponderados por sus pesos se suman. Esto es lo que se denomina la *Regla de Propagación*. La fórmula más habitual de la misma es la suma de todas las entradas ponderadas, denominado Potencial Sináptico  $H_i(t)$  (García Estévez, 2002), mostrado en la expresión 76.

$$H_i(t) = \sum_{j=1}^N X_j w_{ij} \quad (76)$$

Siendo:

- $H_i(t)$  el potencial sináptico de la neurona  $i$  en el momento  $t$ .
- $X_j$  la entrada de datos procedentes de la fuente de información  $j$ .
- $w_{ij}$  el peso sináptico asociado a la entrada  $X_j$  que recibe la neurona  $i$ .

Posteriormente, se compara el potencial sináptico con un valor umbral ( $\theta$ ) y, si el primero iguala o supera al segundo, la neurona se activa y el número resultante se propaga modificado por una función denominada *Función de transferencia*. Existen diferentes funciones de transferencia, las más típicas son (Sanz Molina & Martín del Brío, 2006): función Escalón, Lineal, Sigmoidea, entre otras. Es decir, si  $H_i(t) \geq \theta$  entonces  $Y_i(t) = f(H_i(t))$ , siendo  $Y_i(t)$  la información de salida de la neurona  $i$  en el momento  $t$ . El resultado de esta función en cada neurona de la capa oculta será su salida que se enviará a cada neurona de la capa de salida. Por lo tanto, cada neurona de la capa oculta tendrá tantas conexiones como neuronas de salida hay y cada neurona de salida recibirá tantos flujos de información como neuronas existan en la capa oculta. Los flujos de información

son ponderados por los pesos que unen las neuronas de la capa oculta con las neuronas de la capa de salida. En las neuronas de la capa de salida se realiza el mismo proceso mencionado antes en las neuronas de la capa oculta. La configuración y tamaño de la red influirá directamente en el tiempo de aprendizaje y en la exactitud de los resultados deseados.

De este modo, una red neuronal compuesta por una capa con  $m$  entradas ( $X_1, \dots, X_m$ ) y una sola capa de salida de  $n$  neuronas cuyas funciones de transferencia son la identidad, la salida de la neurona  $i$  ( $Y_i(t)$ ) (expresión 77) será la suma de los pesos por las entradas menos un parámetro adicional  $\mu_i$ , parámetro que proporciona un grado de libertad adicional al modelo:

$$Y_i(t) = \sum_{j=1}^m w_{ji} X_j + \mu_i, \text{ con } i=1, \dots, n \quad (77)$$

El error vendrá dado por la diferencia entre el resultado de la red y el objetivo que se busca. En una muestra finita se define el Error Medio Cuadrático (MSE por sus siglas en inglés Mean Squared Error) como la expresión 78.

$$E(w_{ji}) = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^N \sum_{i=1}^m (c_i^r - y_i^r)^2 \quad (78)$$

Donde:

- $c_i^r$ , el valor de salida deseado, el que la red debería obtener como salida para el patrón  $r$ -ésimo.
- $y_i^r$ , el valor de salida de la red para el patrón  $r$ -ésimo.

Se deberá buscar el conjunto de pesos  $w_{ji}$  que minimice este error. Esta búsqueda se realizará mediante un proceso iterativo denominado *Descenso por el Gradiente* que consiste en calcular el sentido de la máxima variación de la función de error y tomar el camino opuesto. Esta máxima variación viene dada por el gradiente de la función de error en un punto determinado. Lógicamente, al tomar la dirección contraria del gradiente se ira hacia un mínimo, que seguramente será local. El proceso se itera hasta que se alcance ese mínimo.

Dicho con otras palabras, la variación de los pesos depende de su gradiente, pero además, éste será multiplicado por un número pequeño (que disminuye con el número de iteraciones para que la variación sea pequeña, ya que de otro modo, si éste fuese grande se corre el riesgo de que en una variación se “esquive” el mínimo y se vuelva a estar en un punto de ascenso. Por lo tanto, el conjunto de pesos en el momento  $t + 1$  será

igual al valor de esos pesos en el momento  $t$  menos el gradiente por un número infinitesimal llamado ratio de aprendizaje y definirá el tamaño de cada iteración (expresión 79).

$$w(t + 1) = w(t) - \alpha \nabla E(w) \quad (79)$$

Siendo:

- $\nabla(w)$  el gradiente de la función de coste o función de error.
- $\alpha$  el coeficiente de aprendizaje

Hay que llegar a encontrar cierto equilibrio en la definición de  $\alpha$  ya que, si es demasiado pequeño, se necesitarán más iteraciones y el proceso se extenderá en el tiempo, mientras que si  $\alpha$  es muy grande no se encontrará el mínimo porque los movimientos o saltos de búsqueda serán muy grandes

### 3.5.2. Modelización de una RNA

Hay dos fases en la modelización de una RNA:

- Fase de entrenamiento: se usa un conjunto de datos o patrones de entrenamiento para determinar los pesos sinópticos que definen el modelo de red neuronal. Se calculan de manera iterativa, de acuerdo con los valores de los valores de entrenamiento, con el objeto de minimizar el error cometido entre la salida obtenida por la red neuronal y la salida deseada.
- Fase de Prueba: en la fase anterior, el modelo puede que se ajuste demasiado a las particularidades presentes en los patrones de entrenamiento, perdiendo su habilidad de generalizar su aprendizaje a casos nuevos (sobreajuste). Para evitar el problema del sobreajuste, es aconsejable utilizar un segundo grupo de datos diferentes a los de entrenamiento, es decir, un grupo de validación que permita controlar el proceso de aprendizaje.

Las redes neuronales se clasifican comúnmente en términos de sus correspondientes algoritmos o métodos de entrenamiento: redes de pesos fijos, redes no supervisadas, y redes de entrenamiento supervisado.

## **CAPÍTULO IV**

# **GIRSU EN REGIONES ESPECÍFICAS**



#### 4.1. GIRSU en el Sudoeste de la Provincia de Bs. As

El sudoeste de la provincia de Buenos Aires (SOBA) comprende 22 partidos (ver Figura 27) abarcando 736.472 habitantes (año 2010) en una superficie de 100.618 km<sup>2</sup>. Debe destacarse el hecho de que sólo tres partidos (Bahía Blanca, Tres Arroyos y Coronel Rosales), concentran casi el 63% de la población de la región, el 60% de los locales correspondientes a la industria manufacturera, comercio y servicios, el 75% de los ocupadores industriales de la región, y el 86% del PBG. El partido de Bahía Blanca es la jurisdicción más importante de la región en términos de tamaño poblacional, concentrando casi el 50% de la población de la región estudiada. En este partido, la industria manufacturera es la actividad principal, generando más del 20% del producto bruto geográfico total del partido, y el 7% de la actividad industrial de la Provincia, siendo este aporte uno de los más altos entre todos los partidos del interior. En Coronel Rosales, el comercio constituye el sector más importante dentro de su estructura productiva, aportando el 13% del producto local; le siguen en importancia la industria (10%), el transporte (9%) y la construcción (9%). En términos de participación en el producto de la región, el sector correspondiente a la enseñanza sobresale como el de mayor contribución. Para el partido de Tres Arroyos la actividad agropecuaria, con una participación de 16%, constituye el sector más importante dentro de su estructura productiva; le siguen en importancia el comercio (14%) y la industria (12%). Además, el sector “Intermediación financiera y otros servicios financieros” realiza el segundo mayor aporte, entre los partidos del Interior. Por otro lado, se ubica Monte Hermoso, único municipio de la región categorizado como uno de los “Municipios de la Costa” de la provincia. Monte Hermoso posee una estructura productiva en la cual sobresalen los servicios hoteleros y restaurantes, con una participación cercana al 15%. Un último grupo está constituido por partidos donde el sector “Agricultura, ganadería, caza y silvicultura” constituye la principal actividad productiva (Fund. Observatorio Pyme, Universidad Tecnológica Nacional, Bononiae Libris, 2008).

En 2006 se sancionó la Ley 13.592 de GIRSU de la Provincia de Buenos Aires. La misma tiene como objeto fijar los procedimientos de gestión de los RSU, de acuerdo con las normas establecidas en la Ley Nacional N° 25.916. Desde entonces, distintas iniciativas e inversiones se han llevado a cabo en la región en pos de una correcta GIRSU. Sin embargo, en líneas generales, los avances al día de la fecha no han sido los esperados. En primer lugar, hay no menos de 34 BCA, de medianos a grande. Eso sin contar los

ilegales que, si bien son mucho más reducidos, continúan proliferando. Hay sólo 3 distritos que cuentan con rellenos sanitarios y hay 17 plantas de tratamiento/acopio de residuos reciclables.

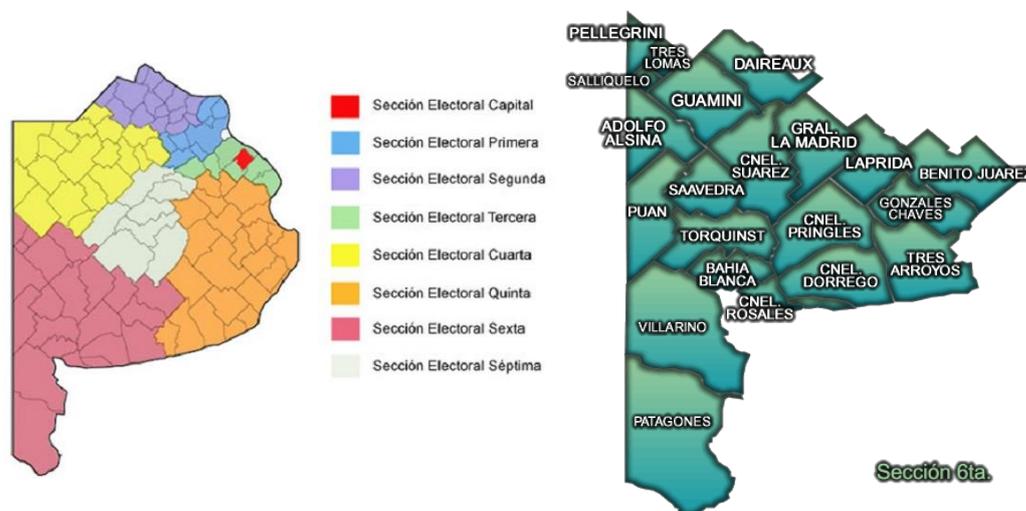


Figura 27. Izquierda: Secciones electorales de la Provincia de Buenos Aires. Derecha: partidos de la sexta sección correspondiente a la región del Sudoeste.

Uno de los factores que explica esta realidad son los altos costos que demanda un apropiado tratamiento de los RSU, tanto el aspecto de la infraestructura como en el de la operatividad diaria. Como ejemplos, el municipio de Coronel Suarez lleva invertidos 15 millones de pesos para poner en marcha la Planta de Reciclado y cerrar el BCA (Agencias de La Nueva, 2017), mientras que Monte Hermoso, ha tomado 2 créditos por casi 10 millones de pesos para hacer el sector del relleno sanitario y la planta de procesamiento. En el partido de Villarino, se indicó que para crear un módulo de disposición final adecuada se necesitan más de 4 millones de pesos.

Otra de las particularidades evidenciadas en el procesamiento de RSU de la región es que, si se reduce o abandona la inversión por un período determinado, el sistema se deteriora y puede colapsar. Por ejemplo, en el municipio de Coronel Pringles, entre marzo de 2015 y mayo del 2016, la planta de tratamiento de RSU estuvo trabajando al 20% de su capacidad, y el vertedero ubicado junto a ella colapsó de basura. En Bahía Blanca, las iniciativas de GIRSU no han tenido demasiada continuidad y acompañamiento, resultando en puntos limpios colapsados de residuos reciclables. En ambos casos, las consecuencias principales son el descreimiento de la población, y por lo tanto, la disminución de la tasa de separación en origen.

#### **4.1.1. Relevamiento de datos e información**

A continuación, se expone la metodología utilizada para la recolección de datos e información específica de la GRSU del SOBA. En primera instancia se enuncia la encuesta utilizada y posteriormente se describen los resultados obtenidos

##### **4.1.1.1. Encuesta**

A fin de recolectar información acerca de la gestión de RSU en SOBA se realizó un formulario web y un documento de MS. Word, para encuestar a personas encargadas de la GRSU. El mismo se envió vía email a los encargados de la gestión de RSU de los 22 distritos del SOBA para que completen un formulario por cada localidad existente en el distrito o por cada grupo de localidades que comparten la GRSU. A pesar de reiterados intentos, solo se consiguieron las respuestas de 19 municipios.

##### El formulario consistió en 6 secciones:

1. Datos Generales de la localidad:
  - Cantidad de Habitantes.
  - Densidad poblacional.
2. Sistema de Gestión:
  - Métodos de disposición final.
  - Disponibilidad de Planta de separación y acopio de RSUR.
3. Recolección:
  - Alcance del sistema de recolección de RSU.
  - Justificación de las rutas de recolección utilizadas.
  - Justificación de la/s frecuencias de recolección utilizadas.
  - Capacidad disponible de camiones.
  - Frecuencia de recolección.
  - Horas semanales totales de los trabajadores involucrados en la recolección de RSU.
  - Cantidad de RSU totales recolectada en el último año.
4. Recuperación:
  - Sistema de recuperación de RSU reciclables utilizado.
  - Cantidad de RSU por fracción recuperada (papel/cartón, envases, vidrio, orgánico y resto).
  - Frecuencia de recolección por fracción.
  - Destino y localización del material recuperado por fracción.
  - Existencia de un programa de recolección de aceite vegetal recuperado.
  - Existencia de un programa de recolección de residuos especiales y peligrosos.
5. Percepción Social:
  - Campañas de concientización para disminuir la generación de basura por habitante.
  - Mecanismos para medir la percepción social del sistema de GRSU.
  - Relación del organismo gestor de RSU con los recolectores informales.
6. Autoevaluación:
  - Causa de no llevar a cabo una recolección diferenciada de RSU.

#### **4.1.1.2. Resumen de respuestas obtenidas**

A continuación, se describe el resumen de las respuestas obtenidas, según las secciones de la encuesta mencionada

##### **4.1.1.2.1. Recolección y disposición final**

El tipo de recolección de RSU utilizado en todos los distritos encuestados del SOBA es el denominado “Puerta a Puerta”. En el mismo, la ciudad es dividida en áreas por donde circula un camión recolectando las bolsas de residuos depositados por los vecinos en los cestos de cada domicilio. El trabajo de colección de las bolsas, es manual, dado por una o dos personas que bajan y suben al camión continuamente durante todo el recorrido. Lo que si varía entre las localidades, es la frecuencia con la que dicho camión pasa por un mismo sitio a recolectar las bolsas. El promedio indicó entre 5 y 6 veces por semanas, y la mayoría (el 63,2%) recolecta 6 veces por semana. Como extremos, 3 localidades recolectan 3 veces/semana, y 2 casos, 7 veces por semana.

El valor de más frecuente de generación de RSU ronda los 0,85 kg/habitante-día. Sin embargo, la media es de 1,12 kg/habitante-día, debido a la existencia de valores atípicos por encima de los 3 kg/habitante-día, como el caso de Monte Hermoso, municipio turístico que recibe mucha población estacional que incrementa el valor de generación anual. Respecto al alcance del servicio de recolección de RSU, los valores son muy buenos, superiores a 85%, con una moda de 100% de la población, y una media de 96,32%.

El resumen de disposición final de RSU indicada por los municipios se muestra en la Tabla 18. Como se dijo anteriormente, el SOBA posee 3 Rellenos Sanitarios, uno en Bahía Blanca, Tres Arroyos y Casbas. Además de los residuos propios de dichas localidades, a los mismos llegan RSU de otros municipios, y es por esto que 6 casos tildaron la opción de relleno sanitario. El mecanismo más utilizado es el vertedero semicontrolado y, a pesar de los intentos de erradicación, todavía existen basurales sin control.

Sobre la pregunta correspondiente a los métodos de determinación de las rutas y frecuencias de recolección, dos municipios no respondieron y algunos marcaron más de una opción. El resumen se muestra en la siguiente Tabla 19. Obsérvese, que las rutas de recolección en todos los casos son fijas, y la mayoría respondió que fueron determinadas en función de la experiencia. Lo mismo sucede con la frecuencia, con la diferencia que 2 localidades presentan frecuencia variable en función de la demanda de los vecinos. Sólo

Tres Arroyos planificó tanto las rutas como la frecuencia utilizando un software de optimización o ruteo.

Tabla 18. Resumen de métodos de disposición final de RSU en SOBA

Disposición Final	Respuestas		% sobre total de localidades
	Nº	Porcentaje sobre total de respuestas	
Relleno sanitario	6	23,1%	31,6%
Vertedero semicontrolado	11	42,3%	57,9%
Basural	7	26,9%	36,8%
Incineración	2	7,7%	10,5%
Total	26	100,0%	136,8%

Tabla 19. Resumen de métodos de determinación de rutas de recolección y frecuencias en SOBA

Determinación de: Rutas de recolección	Respuestas		% sobre total de localidades
	Nº	% sobre total de respuestas	
Fija. Herencia de gestión anterior	4	21,1%	23,5%
Fija. En función de la experiencia	14	73,7%	82,4%
Fija. Utilización de software	1	5,3%	5,9%
Total	19	100,0%	111,8%
<b>Frecuencia de Recolección</b>			
Fija. Herencia de gestión anterior	8	42,1%	47%
Fija. En función de la experiencia	8	42,1%	47,1%
Fija. Utilización de software	1	5,3%	5,9%
Frecuencia Variable	2	10,5%	11,8%
Total	19	100,0%	111,8%

#### **4.1.1.2.2. Recuperación de RSUR**

De los 18 municipios encuestados, 13 (68,4%) afirman desarrollar algún programa de recuperación de residuos reciclables de papel/cartón, plásticos, metales y vidrio. De estos, 6 casos realizan recolección diferenciada por días, y los restantes 5 casos, poseen centros de disposición de RSUR, llamados “Puntos Limpios” o “Ecopuntos”, a los cuales el ciudadano debe llevar sus RSUR separados. Respecto al destino de los materiales recuperados, dado que 12 localidades poseen plantas de acopio (algunas están compartidas dentro del partido), en primera instancia los RSUR son acondicionados y acopiados en dichas plantas y luego vendidos a una planta de tratamiento fuera de la localidad. Sólo dos casos respondieron vender directamente el RSUR por no tener planta de acopio.

Respecto a los residuos orgánicos, solo 7 municipios realizan algún programa de recuperación y tratamiento de los mismos mediante una planta de compostaje. Los RSU

especiales y/o peligros son recolectados en 8 localidades, mientras que en 12 casos existen programas de recolección de aceite vegetal usado.

A los gestores que respondieron que no llevaban ningún programa de recuperación de RSUR se les consultó cual consideraban que era la causa de dicha falencia. De las opciones sugeridas, el 57% respondió que primero debería mejorarse el sistema actual de GRSU para luego pensar en recuperar materiales. Luego, en partes iguales, las causas elegidas fueron la falta de presupuesto, la mala predisposición de la sociedad y la inviabilidad de un sistema de recuperación.

Ligado al compromiso social, el 64,7% afirmó realizar acciones de concientización de la sociedad respecto a la separación de materiales reciclables y la disminución de la generación. En general respondieron realizar trabajos en las escuelas, recorridas por los barrios llevando folletería, difusión en radio y TV, uso de redes sociales, capacitaciones y programas de *ecocanje*.

#### **4.1.1.2.3. Relación con la sociedad**

Se indagó sobre las acciones llevadas a cabo por la gestión para obtener *feedback* de la sociedad respecto a la GRSU. El 43,8% respondió que no lleva a cabo ninguna acción al respecto. De los que, si lo hacen, el 87,5% tiene a disposición número de teléfonos, email y redes sociales para recibir sugerencias, consultas y reclamos de los vecinos, y un solo caso dijo hacer eso más una encuesta a la población indagando sobre aspectos varios de la gestión. Sin embargo, ningún municipio pudo presentar algún resultado o indicador que indique como percibe la sociedad a la gestión. El 33% dijo no tener ningún registro y el resto tiene algunos datos pero no procesados ni concluyentes.

Por último, se indagó acerca de la relación de la gestión con los recolectores informales o “cartoneros”. El 50% respondió que no existen dichas personas en la localidad, el resto, en partes iguales dijeron tener una relación indiferente y ofrecer instalaciones y/o vehículos para contribuir con el trabajo de los cartoneros.

## **4.2. GRSU en Cataluña**

Cataluña (en catalán: Catalunya), segunda región de análisis de la presente tesis doctoral, es una comunidad autónoma española, situada en el nordeste de la península ibérica. Ocupa un territorio de unos 32000 km<sup>2</sup> que limita al norte con Francia (Occitania) y Andorra, al este con el mar Mediterráneo a lo largo de una franja marítima de unos 580

kilómetros, al sur con la Comunidad Valenciana, y al oeste con Aragón. Cataluña está formada por las provincias de Barcelona, Gerona, Lérida y Tarragona (Figura 28). Su capital es la ciudad de Barcelona. Habitan 7.504.008 personas, distribuidas en 41 comarcas que a su vez abarcan 947 municipios, de los cuales, 64 superan los 20000 habitantes (en los que vive el 70 % de la población catalana). Dos tercios de la población viven en el ámbito metropolitano de Barcelona.



Figura 28. Mapa político de las provincias, comarcas y municipios de Cataluña.

A través del organismo autónomo *Junta de Residuos*, comienza en 1983, el interés por la gestión de los RSU. En 1994, este organismo se convierte en empresa pública y en 2003 es cuando se denomina *Agencia de Residuos de Cataluña*, actual encargado de la GIRSU. Esto demuestra una tradición de más de 20 años abordando la problemática de los residuos y, el interés que desde un principio se ha demostrado por los temas ambientales en Cataluña, dan como resultado una recolección selectiva de los RSU cercana al 38%, superando, como se mencionó anteriormente, la media española y se sitúa en la línea de los países más avanzados (Cano, 2011).

Gracias al esfuerzo de toda la sociedad, del sector privado, de las administraciones locales y del personal profesional de la Agencia se ha alcanzado un buen nivel de gestión que ha ayudado a consolidar un sector económico, el de la gestión de los residuos. En este sector se encuentran más de 800 empresas que desarrollan su labor de servicio en todos los campos: recuperación, tratamiento y disposición final. La acción de la Agencia se centra en establecer las bases normativas y de planificación de la gestión de los residuos municipales, industriales, de la demolición y construcción, entre otros. En el campo de los residuos municipales se encarga de la coordinación y consenso con las

administraciones locales, que son las que tienen la competencia directa de gestión. En este sentido se ha ido tejiendo una red de instalaciones (puntos limpios, plantas de compostaje, plantas de selección de envases, plantas de tratamiento de fracción resto, incineradoras, vertederos controlados) para gestionar de forma próxima los RSU. Es una red que ha ido creciendo año tras año y que en los últimos años han supuesto más de 500 millones de euros de inversión (Diputació Barcelona, 2016).

Los objetivos de la Agencia son trabajar intensamente para que en Cataluña se desarrolle adecuadamente la jerarquía europea de los residuos, esto es, comenzar por la prevención, la reutilización, la valorización material, otras formas de valorización incluida la energética, y finalmente como opción final la disposición en vertedero. La prevención conlleva la adopción de formas de cambio de consumo, de abandonar la cultura del usar y tirar, y para ello, se han impulsado algunas acciones como, por ejemplo, acuerdos voluntarios con el sector de la distribución para reducir el consumo de bolsas de plástico de un solo uso, aspecto en el que a nivel del Estado, Cataluña ha sido pionero (Saladiè & Santos-Lacueva, 2016).

La recolección selectiva consiste en la recolección por contenedores diferenciados en vidrio, papel, envases ligeros y fracción orgánica (Agència de Residus de Catalunya, 2014). Cataluña es también pionero en España en lo que se refiere a la colección y tratamiento de la fracción orgánica, situándose a nivel de los países más avanzados al haber extendido la obligación de esta recolección en toda Cataluña, a través de los Planes de Despliegue que han presentado las administraciones locales. La fracción orgánica proporciona con su tratamiento un compost de calidad, que sirve como abono orgánico para la agricultura.

Otro aspecto positivo de la GIRSU de Cataluña es que desde 2004 incorporaron instrumentos fiscales, como el canon de residuos, que se cobra a los municipios en proporción a la cantidad de RSU depositada en vertedero. También se registran algunas experiencias de pago por generación, como la del municipio de Torrelles de Llobregat, un sistema basado en pago por bolsa que se puso en marcha en 2003, y la del ayuntamiento de Molins de Rei que utiliza un sistema de pago por contenedor para los residuos comerciales, en donde cada comercio gran generador tiene un cubo para materia orgánica y otro para inorgánica (Báez Alcántara, 2016). Los fondos recaudados, retornan a las administraciones locales para premiar aquellas gestiones de residuos que

impulsen una buena recolección selectiva, es decir, incentiva la recolección diferenciada y penaliza los residuos destinados a vertedero o a incineradora. Asimismo, la recaudación obtenida es destinada a un Fondo de Gestión de Residuos, que se utiliza para investigar sistemas de tratamiento alternativos, financiar el tratamiento de la fracción orgánica recolectada selectivamente y realizar campañas de sensibilización ambiental.

A partir de la recuperación, los residuos reciclables se incorporan de nuevo en la cadena productiva con todos los beneficios económicos que eso conlleva (ver Figura 29). Como se mencionó, más de 800 empresas dedicadas a este ámbito, se consolida un sector económico contributivo que aporta el 6% del valor bruto catalán anual. Además, este conjunto de empresas representa también un papel importante de fijación del tejido industrial productivo, ya que dan servicio a las más de 20000 empresas catalanas productivas que necesitan de sus servicios para gestionar los residuos. Asimismo, estas empresas recuperan más del 70% de los residuos industriales y se recicla en torno al 50% de los residuos de la demolición y la construcción.

#### **4.2.1. Relevamiento de datos e información**

A continuación, se expone la metodología utilizada para la recolección de datos e información de la GRSU de Cataluña. En primera instancia se enuncia la encuesta utilizada y posteriormente se describen los resultados obtenidos

##### **4.2.1.1. Encuesta**

Con el fin de recolectar información acerca de la gestión de RSU en Cataluña se realizó un formulario web para encuestar a personas encargadas de la GRSU. La misma se envió vía email a todas las 47 comarcas y a los ayuntamientos mayores de 20.000 habitantes (64). Para ello se efectuó una ardua búsqueda de contactos a través de distintas fuentes como páginas web de los municipios, páginas del gobierno de Cataluña, páginas de organizaciones gestoras de RSU, entre otras. Se creó una base de datos, se enviaron los respectivos emails y a modo de dar una orientación sobre los motivos de la realización de la encuesta, se contactó telefónicamente a la gran mayoría de los gestores. Asimismo, con 3 de ellos se realizaron entrevistas personales. Sin embargo, a pesar de los reiterados intentos, sólo se consiguió que 20 gestores completaran el cuestionario, de los cuales uno fue descartado por suministrar información muy general o incompleta.

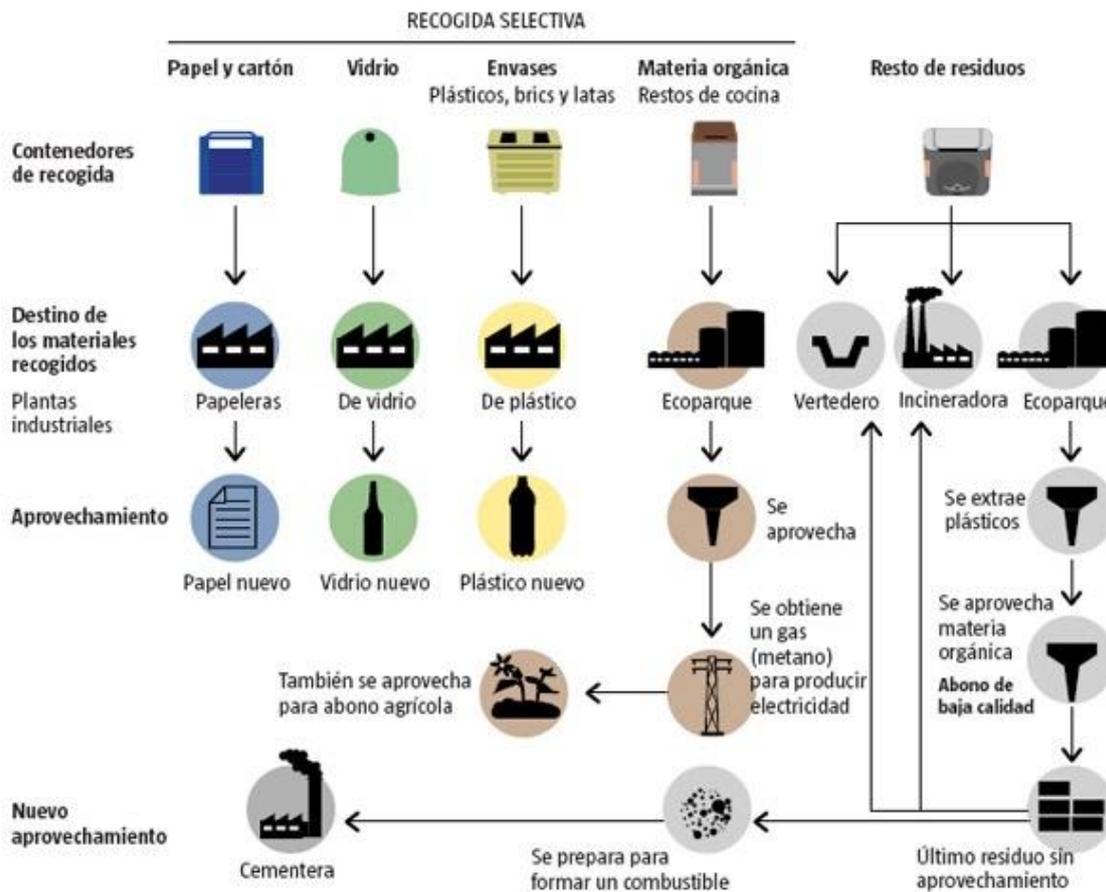


Figura 29. Origen y destino de los RSU en Cataluña<sup>14</sup>.

El formulario consistió en 6 secciones:

1. Datos Generales del Ayuntamiento o Comarca:
  - Cantidad de Habitantes.
  - Población estacional.
  - Densidad poblacional.
2. Sistema de Gestión:
  - Características públicas o privadas de la gestión y justificación de dicha elección.
  - Métodos de disposición final.
3. Recolección:
  - Alcance del sistema de recolección de RSU.
  - Sistema de recolección utilizado y justificación del mismo.
  - Justificación de las rutas de recolección utilizadas.
  - Justificación de la/s frecuencias de recolección utilizadas.
  - Justificación de la ubicación de los contenedores dispuestos.
  - Horas semanales totales de los trabajadores involucrados en la recolección de RSU.

<sup>14</sup> Imagen extraída del diario digital La Vanguardia, <https://www.lavanguardia.com/medio-ambiente/20111028/54237261938/el-area-de-barcelona-saca-petroleo-de-la-basura.html>.

- Cantidad de RSU totales recolectada en el último año.
- 4. Recuperación:
  - Cantidad de RSU por fracción recuperada (papel/cartón, envases, vidrio, RAEE, orgánico y resto).
  - Capacidad total de contenedores acumuladores de RSU por fracción.
  - Frecuencia de recolección por fracción.
  - Destino y localización del material recuperado por fracción. Y justificación del mismo.
  - Cantidad de aceite vegetal recuperado.
  - Programa de recolección de residuos especiales y peligrosos.
- 5. Percepción Social:
  - Campañas de concientización para disminuir la generación de basura por habitante.
  - Mecanismos para medir la percepción social del sistema de GIRSU.
  - Relación del organismo gestor de RSU con los recolectores informales.
- 6. Proyección y Autoevaluación:
  - ¿Cómo se establecen las metas a alcanzar?
  - Indicadores de alerta.
  - Métodos de proyección y planificación de crecimiento.
  - Métodos de control y seguimiento.
  - Autoevaluación del sistema de GIRSU.
  - Puntos débiles del sistema de GIRSU.

#### **4.2.1.2. Resumen de respuestas cualitativas obtenidas**

A continuación, se describe el resumen de las respuestas cualitativas obtenidas, según las secciones de la encuesta mencionada

##### **4.2.1.2.1. Recolección**

El sistema de recolección utilizado común a todos los encuestados es el sistema por contenedores comunitarios diferenciados en Envases, Vidrios, Papel/Cartón, Orgánico, Resto, junto con Puntos Limpios (denominados Deixallerias) en los cuales los ciudadanos pueden acercarse a dejar sus RSU reciclables y/o voluminosos. El 50% de los casos, añadió la recolección puerta a puerta de residuos reciclables en ciertos sectores de la ciudad, mayoritariamente en los sectores comerciales.

Para justificar el sistema GIRSU utilizado, la mayoría respondió haber tomado la decisión en base a un equilibrio entre un análisis de técnico del municipio (mejor sistema según trama urbana, climatología, costumbres de la población, generación residuos, etc) con las posibilidades/oportunidades políticas y las demandas normativas. En un caso, se mencionó que se priorizó facilitar la participación ciudadana en el sistema.

#### 4.2.1.2.2. Recuperación

El destino de los materiales reciclables recuperados fue decidido, en todos los casos, en función de la planificación de la Agencia de Residuos de Catalunya en su plan de infraestructuras y los organismos de Sistemas Integrales de Gestión (SIG) de RSU. A partir de las posibilidades de tratamiento, transferencia o disposición final que dicho plan ofrecía, cada municipio optó por enviar sus RSU a aquellos ubicados más próximamente a los municipios.

Para la gestión táctica de los RSU se consultó a los gestores de qué manera habían determinado la ubicación de los contenedores comunitarios, las rutas de recolección y la frecuencia de vaciado de los mismos. Las respuestas (Tabla 20) ofrecían opciones cerradas, donde podían elegir más de una, así como completar con alguna respuesta alternativa en la casilla “otros”. La mayoría (32%) respondió haber realizado cálculos aproximados en función de la superficie y la cantidad de población por sector. A la par, un 26% dio la respuesta anterior añadiendo un análisis visual y recorrido por la ciudad, y un 16% incorporó, a su vez, la ubicación según los lugares más densamente poblados. Otro 16% respondió sólo realizar un análisis visual y recorrido por la ciudad, un solo caso sólo tuvo en cuenta los lugares de mayor densidad, y otro, en base a la máxima distancia recorrida por el usuario junto a la realización de cálculos en función de la superficie y la población del sector.

Respecto a la metodología utilizada para determinar las rutas de recolección de RSU (Tabla 21), es decir de vaciado de los contenedores comunitarios y/o las recolecciones puerta a puerta, el 68% dijo que las rutas fueron determinadas a partir de la experiencia y de los ajustes realizados con el paso de los años. Un 16% dijo utilizar un software de optimización, en tanto un 8% dijo determinar las rutas en función de la demanda (rutas variables), y otro 8% que las rutas han sido heredadas de gestiones anteriores.

Análogamente, la frecuencia de vaciado de contenedores o recolección de RSU se determinó en el 57,69% de los casos, por la experiencia (ver Tabla 22). Un 11,54% en función de un estudio técnico, al igual que la opción de frecuencias heredadas y frecuencias variables. Un 7,69% utiliza software de optimización, pero curiosamente, no coinciden con las localidades que utilizan software para determinar las rutas.

Tabla 20. Resumen de Metodología para la ubicación de contenedores en Cataluña.

Metodología para la ubicación de contenedores	Respuestas		% sobre total de localidades (19)
	Nº	% sobre total de respuestas (32)	
A partir de cálculos aproximados en función de la superficie y la cantidad de población por sector.	15	46,88	78,95
A partir de un análisis visual y de recorrido por la ciudad.	11	34,38	57,89
Disposición en los sitios más densamente poblados de la ciudad.	5	15,63	26,32
Distancia máxima a usuario	1	3,13	5,26
Total	32	100	168,421

Tabla 21. Resumen de metodologías de determinación de las rutas de recolección de RSU en Cataluña.

Metodología de determinación de las rutas de recolección de RSU	Respuestas		% sobre total de localidades (19)
	Nº	% sobre total de respuestas (25)	
Rutas fijas por experiencia	17	68,00	89,47
Uso de Software	4	16,00	21,05
Rutas fijas heredadas	2	8,00	10,53
Rutas variables	2	8,00	10,53
Total	25	100	131,579

Tabla 22. Resumen de metodologías de determinación de la frecuencia de recolección de RSU en Cataluña.

Metodología de determinación de la frecuencia de recolección de RSU	Respuestas		% sobre total de localidades (19)
	Nº	% sobre total de respuestas (26)	
En función de la experiencia	15	57,69	78,95
Uso de software	2	7,69	10,53
Frecuencias variables	3	11,54	15,79
Frecuencias heredadas	3	11,54	15,79
Estudio técnico	3	11,54	15,79
Total	26	100	57,89

Por otra parte, en los puntos limpios se admiten residuos especiales o peligrosos procedentes de particulares. Estos residuos son transportados y gestionados por gestores de residuos autorizados por la Agencia de Residuos de Cataluña.

#### **4.2.1.2.3. Percepción social**

Todos afirman realizar campañas de concientización. Los municipios que dieron más detalles de las mismas, nombraron talleres en escuelas, concientización a través de los medios de comunicación y folletería, organización de jornadas, charlas y visitas guiadas a las plantas de reciclaje y puntos limpios, y personas nombradas como "comunicadoras

ambientales" encargadas de realizar difusión y concientización personalizada a los ciudadanos.

La pregunta sobre el mecanismo utilizado para medir la percepción social (Tabla 23) del sistema de GIRSU, poseía 6 opciones cerradas y una opción de "otros" para completar libremente. En esta última las respuestas fueron: Redes Sociales, Foros de quejas, Encuestas puntuales, Aplicación de celular y Programa de seguimiento.

Tabla 23. Resumen de respuestas de metodologías de percepción social en Cataluña-

Metodología de percepción social	Respuestas		% sobre total de localidades (19)
	Nº	% sobre total de respuestas (33)	
E-mail para sugerencias y reclamos,	10	30,30	52,63
Encuesta anual	4	12,12	21,05
Línea telefónica para sugerencias y reclamos	9	27,27	47,37
No se realiza ninguna acción al respecto	3	9,09	15,79
Otros	7	21,21	36,84
Total	33	100	173,68

Con respecto a la pregunta sobre la relación de los gestores de RSU con los recolectores informales, se presentaron 4 opciones cerradas y una opción de "otros" para completar libremente. Las mismas se muestran en la Figura 30.

#### 4.2.1.2.4. Proyección y autoevaluación

Las metas de todos los municipios son marcadas por el *Programa de prevención y gestión de residuos en Cataluña para el año 2020 (PRECAT)* en concordancia con las metas de la UE. El indicador establecido como meta es el porcentaje de residuos reciclables recuperados, del cual se espera incrementar la valorización global hasta el 65% de los residuos generados, así como subir la recolección selectiva bruta hasta el 60% de los residuos municipales, para el mencionado año. En base a esto, es que dicho índice se convierte en el indicador de alerta para determinar si es necesario realizar alguna acción de mejora del sistema. En algunos casos se mencionó que dicho número se compara con la evolución de los últimos años, así como con la media de la comarca y los objetivos del PRECAT.

La proyección y planificación de los requerimientos de capacidad futuros se establecen en base a los datos y tendencias detectadas con respecto a cantidad de población y cantidad de RSU generado. En general, previo a un nuevo proceso de licitación del servicio de GIRSU se realiza un estudio de dichas variables para prever las necesidades

del mismo. En el estudio, suelen tenerse en cuenta los intereses de las diferentes partes afectadas, como ciudadanos, comerciantes, empresas concesionarias y ayuntamiento, para lo cual se realizan reuniones entre los representantes de las mismas.

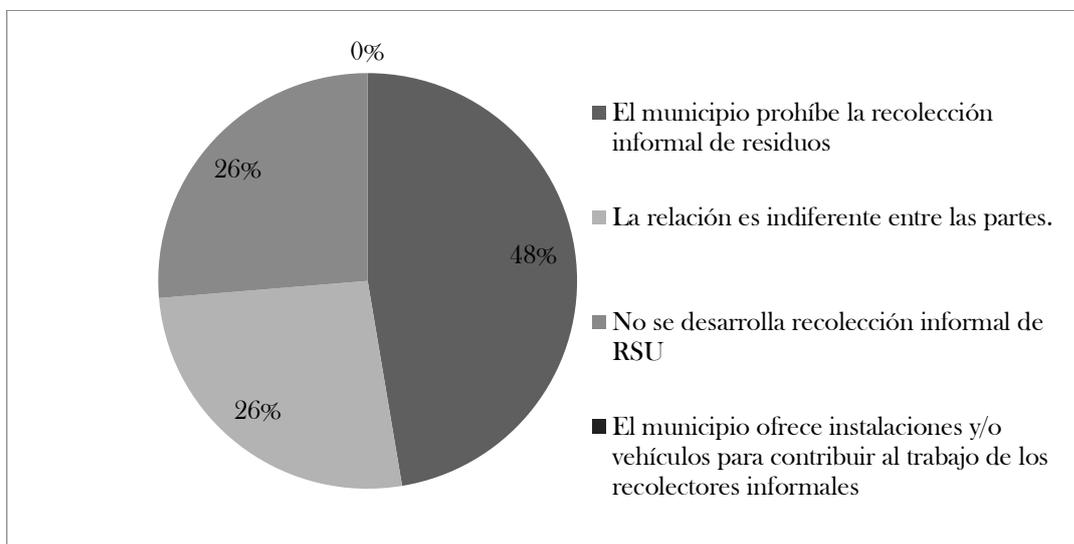


Figura 30. Relación con los recolectores informales en Cataluña

Para el control y seguimiento del alcance de las metas se llevan estadísticas mensuales de la evolución en la generación de RSU y el porcentaje de recolección selectiva. En lo que respecta al seguimiento de la gestión táctica, se utilizan sistemas de GPS de los camiones recolectores y un sistema de identificación, pesaje y control de los contenedores. En algunas localidades, el ayuntamiento dispone de una brigada de inspección que, entre otras funciones, vigila la correcta gestión de residuos de las empresas y particulares. En otros casos, se realiza un control de calidad efectuado por una empresa externa.

Posteriormente, se encuestó sobre los puntos débiles que consideraban dentro de la propia GIRSU. Las respuestas de opciones múltiples permitían seleccionar más de una opción. Como muestra la Tabla 24, el 50% selecciono la falta de concientización social. Las respuestas de Control y seguimiento, Atención y evaluación de la opinión de la comunidad y la escasas de recursos tuvieron un 13,89% cada una. En menor medida (8,33%), se seleccionó como punto débil aspectos logísticos

Finalmente, se les consultó sobre cómo consideraban la GIRSU desarrollada. Entre las respuestas Excelente, Buena, Regular y Malo, el 63% respondió con una gestión buena y el 37% restante, de forma regular (Figura 31).

Tabla 24. Resumen de respuestas sobre punto débiles de la GIRSU en Cataluña.

Puntos débiles	Respuestas		% sobre total de localidades (19)
	Nº	% sobre total de respuestas (26)	
Concientización social.	18	50,00	94,74
Control y seguimiento.	5	13,89	26,32
Atención y evaluación de la opinión de la comunidad.	5	13,89	26,32
Escasos de recursos como camiones, mano de obra, contenedores, etc.	5	13,89	26,32
Logística (recolección, frecuencia, etc.)	3	8,33	15,79
Total	36	50,00	94,74

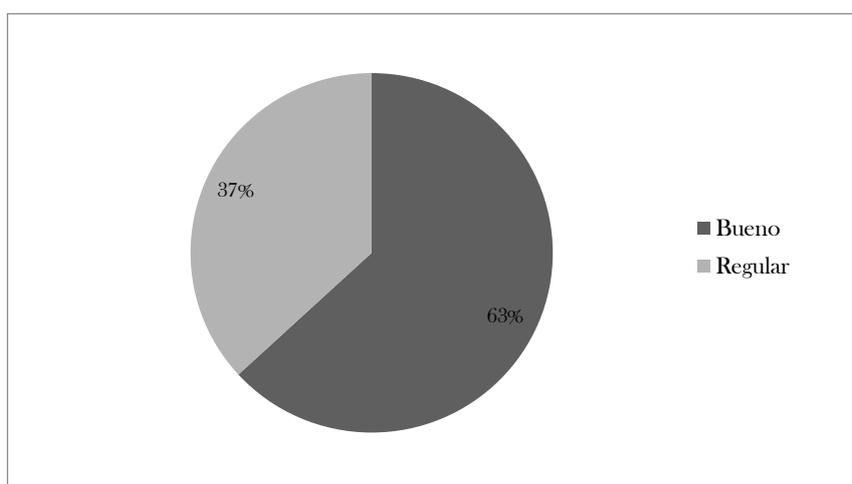


Figura 31. Resumen de respuestas de la autoevaluación de la GIRSU en Cataluña.

### 4.3. Comparación de respuestas

En la siguiente

Tabla 25, se muestra el resumen de las respuestas principales para SOBA y Cataluña de modo de hacer una comparación aproximada de los sistemas de GIRSU utilizados.

Tabla 25. Comparación de respuestas principales entre SOBA y Cataluña.

	SOBA	CATALUÑA
<b>Recolección</b>	“Puerta a puerta” de recolección de residuos sin diferenciar.	Recolección por contenedores diferenciados entre papel/cartón, envases, vidrio, aluminio, orgánico y resto.
<b>Determinación de rutas</b>	Fijas. En función de la experiencia.	Fijas. En función de la experiencia.
<b>Determinación de frecuencias</b>	Fija. En función de la experiencia y de la herencia.	Fija. En función de la experiencia.
<b>Recuperación de residuos</b>	Algunas iniciativas de recuperación residuos reciclables mediante “puntos limpios” o recolección puerta a puerta.	Dentro del sistema establecido de recolección.
<b>Concientización social</b>	Mayoría no realiza.	Todos si realizan.
<b>Percepción social</b>	Mayoría realiza pero no mide (56,2%).	Mayoría realiza y mide (84,21%).
<b>Relación con recolectores informales</b>	Mayoría dice que no hay recolección informal (50%).	Mayoría prohíbe la recolección informal (48%).

## **CAPÍTULO V**

# **ANÁLISIS DE EFICIENCIA EN LA GTRSU**



## 5.1. Modelos DEA y resultados de eficiencia en SOBA

En la presente sección se muestran los modelos DEA definidos para el análisis de eficiencia relativa en el SOBA.

### 5.1.1. Elección y definición de subindicadores

La siguiente Tabla 26 indica los subindicadores seleccionados para utilizar como *inputs* y *outputs* en los análisis DEA del SOBA, así como la forma de cómputo, la unidad de medida y el objetivo de los mismos. Posteriormente en la Tabla 27 se muestran los valores máximos, mínimos que toman dichos subindicadores dentro de los datos relevados, además de la media y desvío de cada uno.

Tabla 26. Subindicadores seleccionados para los análisis DEA en el SOBA.

Subindicador	Descripción	Forma de cómputo	Unidad de medida	Objetivos
Capacidad Camiones (C)	Capacidad del total de camiones utilizados para recolectar los RSU	Suma de las capacidades de los camiones recolectores de RSU utilizados	M <sup>3</sup>	Optimizar la capacidad de los camiones en función de la generación de RSU. Optimizar recorridos y frecuencias
Capacidad Camiones Fracción reciclable (Cr)	Capacidad del total de camiones utilizados para recolectar los RSUR	Suma de las capacidades de los camiones recolectores de RSUR utilizados	M <sup>3</sup>	Optimizar la capacidad de los camiones en función de la generación de RSUR. Optimizar recorridos y frecuencias
Personal (M)	Horas de trabajo total del personal dedicado a la recolección de los RSU, es decir, personas que son transportadas por el camión recolector: conductor y recolectores manuales	Sumatoria de las horas por semana trabajadas por el personal involucrado	Horas por semana (hs/sem)	Optimizar el trabajo del personal involucrado en función de la generación de RSU, Optimizar recorridos y frecuencias
Personal Fracción reciclable (Mr)	Horas de trabajo total del personal dedicado a la recolección de los RSUR, es decir, personas que son transportadas por el camión recolector: conductor y recolectores manuales	Sumatoria de las horas por semana trabajadas por el personal involucrado	Horas por semana (hs/sem)	Optimizar el trabajo del personal involucrado en función de la generación de RSUR, Optimizar recorridos y frecuencias
Frecuencia de recolección (F)	Cantidad de veces que se recolecta RSU en un mismo sitio en una semana.	Conteo de cantidad de veces que se recolectan los RSU. En caso que varíe según barrios o sectores, se hace un promedio ponderado según el área abarcada	Veces por semana	Optimizar la frecuencia de recolección en función de la generación de RSU. Dicho objetivo no sólo tiene que ver con una cuestión de cálculos sino que también demanda el compromiso de los ciudadanos en cumplir con la rutina de colocar sus bolsas de basura en los cestos externos a

				<p>sus vivienda en un horario y día predefinido, de forma de maximizar la organización de la recolección a través de la minimización de la frecuencia.</p>
<p>RSU recolectado (O)</p>	<p>Cantidad de RSU recolectado</p>	<p>Sumatoria de los RSU recolectados durante un año</p>	<p>tn/año</p>	<p>Estimar la cantidad de RSU generados por la población y determinar la capacidad necesaria de recursos para el sistema de gestión de RSU. El objetivo a largo plazo es que dicho indicador disminuya, esperando una disminución en la generación de RSU de la población.</p>
<p>RSUR recolectado (Orr)</p>	<p>Cantidad de RSUR recolectados: papel/cartón, plásticos, metales y vidrio)</p>	<p>Sumatoria de los RSUR recolectados durante un año.</p>	<p>tn/año</p>	<p>Estimar la cantidad de RSUR generados por la población y determinar la capacidad necesaria de recursos para el sistema de gestión de RSUR. El objetivo a largo plazo es que dicho indicador aumente en el sentido que mejore la segregación de los RSU de los habitantes pero no por aumento de la generación de RSU.</p>
<p>Índice de tendencia <math>T_o</math></p>	<p>Índice de tendencia hacia una GRSU (output)</p>	<p>Ver explicación debajo de la tabla</p>	<p>Unidades</p>	<p>Se introduce este índice para valorizar las iniciativas o actividades desarrolladas en torno a la valorización de los RSU y su apropiado tratamiento.</p>
<p>Índice de tendencia <math>T_i</math></p>	<p>Índice de tendencia hacia una GRSU (input)</p>	<p>Ver explicación debajo de la tabla</p>	<p>Unidades</p>	

#### 5.1.1.1. Metodología de cálculo para los índices de tendencia hacia la GRSU

Dado que unos pocos municipios desarrollan una gestión integral de RSU, mientras que otras desarrollan algunas actividades de valorización de RSU y otros no llevan ninguna actividad en ese sentido; es que se pensó el Índice de Tendencia para poder comparar las tan variadas gestiones y valorizar las iniciativas o actividades desarrolladas en torno a la valorización de los RSU y su apropiado tratamiento. A continuación, se explican las metodologías de cálculo de los mismos.

**T<sub>o</sub>:** Se adiciona un punto por cada respuesta afirmativa de los siguientes ítems desarrollados o aplicados en el municipio. Por lo tanto, el índice varía entre 0 y 4, donde aquel municipio que aplique todos los ítems tendrá 4 puntos, mientras que, quien no desarrollo ninguno, obtendrá 0 puntos.

- ¿Posee relleno sanitario?
- ¿Desarrolla recolección diferenciada?
- ¿Existen “Puntos limpios” para depositar RSUR?
- ¿Posee planta de acopio o tratamiento de RSUR?

**T<sub>i</sub>**: se consideran las mismas preguntas utilizadas en T<sub>o</sub>, pero en este caso se considera 0 puntos por cada respuesta afirmativa. Esto se debe a que T<sub>i</sub> será utilizado como input en los análisis DEA. De esta forma, el índice varía entre 0 y 4, donde aquel municipio que aplique todos los ítems tendrá 0 puntos, mientras que, quien no desarrollo ninguno, obtendrá 4 puntos.

Tabla 27. Valores máximos, mínimos, media y desvío de los subindicadores, a partir de los datos relevados en el SOBA.

ND	Tamaño de muestra: 18						Tamaño de muestra: 8		
	C	F	M	O	T <sub>o</sub>	T <sub>i</sub>	Cr	Mr	Orr
Máximo	400	7	15	140.000	4	4	128	576	3419
Mínimo	10	3	1386	934,5	0	0	6	15	66
Media	61,97	5,39	386,22	13167,21	1,94	2,06	33,63	218,44	778,76
Desvío	91,35	1,24	375	32074,32	1,35	1,35	40,55	231,05	1120,3

### 5.1.2. Datos, modelos y resultados

Los datos de cada localidad según cada indicador se muestran en la Tabla 28. La Tabla 29 muestra los 5 análisis propuestos (A1, A2, A3, A4, A5) para realizar sobre las localidades del SOBA, con la especificación de la cantidad de DMUs (ND), los inputs, los outputs y los objetivos considerados en cada caso. La cantidad de localidades consideradas en el A5 se debe a que las restantes 10 no poseen información de los inputs y outputs considerados. Asimismo, en la misma tabla se observa el resumen de los resultados, donde se indican el promedio de los valores de eficiencia obtenidos para los modelos CCR y BCC (-I, orientado al input; -O, orientado al output), así como la cantidad de localidades eficientes y el valor de eficiencia mínimo obtenido

La herramienta DEA fue procesada en Matlab® a través de una consola pública subida en la web por María Isabel Restrepo y Juan G. Villegas (Restrepo & Villegas, 2007). En líneas generales, la misma fue construida en base a la función *lingprog* del *toolbox* de optimización de Matlab®, el cual resuelve problemas lineales usando método simplex, métodos de punto interior o algoritmos primal-dual según los parámetros que se elijan.

Tabla 28. Datos del SOBA utilizados en los análisis DEA

Municipio	C	M	F	Ti	O	Or	To
1. Bahía Blanca	400	4620	6	1	140000,0	0	3
2. Carhué	32	384	7	2	3450,0	66	2
3. Carmen de Patagones	20	360	6	4	5760,0	0	0
4. Casbas	20	144	6	1	1500,0	971	3
5. Coronel Pringles	72	918	5,55	3	16559,2	3419	1
6. Coronel Dorrego	32	336	6	2	4015,0	371,8	2
7. Darregueira	33	777	6	1	3120	0	3
8. Garre-Bonifacio-Arroyo Venado	10	192	6	3	1348,5	0	1
9. Guamini	20	144	6	3	934,5	0	1
10. Laprida	20	216	6	0	4000,0	263	4
11. Monte Hermoso	30	1386	6	1	7770,0	403,26	3
12. Pigüé	45	930	7	2	5256,0	0	2
13. Punta Alta-Villa Arias	110	720	3	4	16242,5	0	0
14. Rivera	17	90	6	1	1450,0	72,8	3
15. Salliqueló	82	480	3	1	1696,7	180	3
16. Stroeder	12	72	3	4	1728,0	0	0
17. Tres Arroyos	128	576	5	0	14099,5	855	4
18. Villalonga	12	120	4	4	2304,0	0	0

Tabla 29. Modelos y resumen de resultados de los análisis DEA en el SOBA.

ND	Inputs	Outputs	Objetivo del análisis	Modelo	Prome-dio	Cantidad de DMUs eficientes	Mínima Eficiencia
<b>A1 ND=18</b>	C F M	O	Minimizar los inputs considerando los RSU totales.	CCR-I	0,57	1	0,13
				BCC-I	0,72	5	0,15
<b>A2 ND=18</b>	C F M	O Orr	Minimizar los inputs considerando los RSU totales más los RSUR.	CCR-I	0,65	3	0,15
				BCC-I	0,79	7	0,18
<b>A3 ND=18</b>	C F M	O Orr To	Minimizar los inputs considerando los RSU totales, los RSUR y las actividades de valorización de RSUR.	CCR-I	0,73	5	0,22
				BCC-I	0,82	11	0,22
<b>A4 ND=18</b>	C F M Ti	O Orr	Minimizar los inputs considerando los RSU totales, los RSUR y las actividades de valorización de RSUR.	CCR-I	0,67	5	0,16
				BCC-I	0,87	11	0,50
<b>A5 ND=8</b>	Cr Mr	Orr	Maximizar los RSUR dados los recursos existentes.	CCR-O	14,5	1	65,12
				BCC-O	5,64	4	19

En la Tabla 30 se muestra en detalle, los valores de eficiencia técnica global (ETG), eficiencia técnica pura (ETP) y eficiencia de escala (EE) obtenidos para cada localidad, según cada análisis y modelo. Como indican las referencias, en colores se muestran las eficiencias alcanzadas y los rendimientos registrados. Por último, y en relación a la Tabla

30, los gráficos de red (Figura 32) muestran como varían los valores de eficiencia de las localidades dentro del mismo análisis según los rendimientos contantes y variables.

### 5.1.3. Análisis de los resultados de eficiencia

Según los resultados mostrados en la Tabla 30, en primera instancia se observa que Bahía Blanca ha sido la única ciudad que registró eficiencia máxima en todos los análisis. Seguidamente, Carmen de Patagones, Garré-Bonifacio-Arroyo Venado, Stroeder y Villalonga obtuvieron  $\theta=1$  en todos los análisis BCC, y Casbas y Cnel. Pringles  $\theta=1$  en 3 de los 4 análisis que incluyen a todas las DMUs. Por el contrario, las localidades que no obtuvieron nunca la máxima eficiencia son Carhué, Cnel. Dorrego, Darregueira, Guaminí, Pigüé y Punta Alta-Villa Arias. Observando el análisis 5, Cnel. Dorrego es quién obtuvo  $\theta=1$  en el modelo CCR, acompañado por Casbas en el modelo BCC.

Tabla 30. Eficiencias obtenidas para cada localidad en cada análisis DEA realizado en SOBA

DMU	Eficiencia	M1	M2	M3	M4	M5
Bahía Blanca	ETG	1,00	1,00	1,00	1,00	
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	
	EE	1,00	1,00	1,00	1,00	
Carhué	ETG	0,34	0,35	0,44	0,35	9,87
	ETP	0,47	0,48	0,52	0,55	9,61
	EE	0,72	0,72	0,85	0,64	1,03
Carmen de Patagones	ETG	0,85	0,85	0,85	0,85	
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	
	EE	0,85	0,85	0,85	0,85	
Casbas	ETG	0,38	1,00	1,00	1,00	1,03
	ETP	0,59	1,00	1,00	1,00	1,00
	EE	0,64	1,00	1,00	1,00	1,03
Coronel Pringles	ETG	0,66	1,00	1,00	1,00	
	ETP	0,71	1,00	1,00	1,00	
	EE	0,93	1,00	1,00	1,00	
Coronel Dorrego	ETG	0,41	0,51	0,56	0,51	1,00
	ETP	0,53	0,61	0,63	0,64	1,00
	EE	0,78	0,83	0,89	0,79	1,00
Darregueira	ETG	0,29	0,29	0,46	0,30	
	ETP	0,42	0,42	0,51	0,55	
	EE	0,68	0,68	0,92	0,54	
Garre-Bonifacio-Arroyo Venado	ETG	0,44	0,44	0,60	0,44	
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	
	EE	0,44	0,44	0,60	0,44	
Guaminí	ETG	0,25	0,25	0,32	0,25	
	ETP	0,59	0,59	0,66	0,72	
	EE	0,42	0,42	0,49	0,35	
Laprida	ETG	0,65	0,74	1,00	1,00	16,71
	ETP	0,84	0,92	1,00	1,00	13,00
	EE	0,77	0,80	1,00	1,00	1,29

Monte Hermoso	ETG	0,75	0,84	1,00	0,84	4,24
	ETP	0,86	0,94	1,00	1,00	4,24
	EE	0,88	0,89	1,00	0,84	1,00
Pigue	ETG	0,34	0,34	0,43	0,34	
	ETP	0,42	0,42	0,47	0,50	
	EE	0,82	0,82	0,91	0,69	
Punta Alta+Villa Arias	ETG	0,75	0,75	0,75	0,75	
	ETP	0,76	0,76	0,76	0,77	
	EE	0,98	0,98	0,98	0,97	
Rivera	ETG	0,59	0,64	1,00	0,64	4,19
	ETP	0,80	0,86	1,00	1,00	4,08
	EE	0,73	0,74	1,00	0,64	1,03
Salliqueló	ETG	0,13	0,15	0,22	0,16	65,13
	ETP	0,15	0,18	0,22	1,00	18,99
	EE	0,84	0,86	1,00	0,16	3,43
Stroeder	ETG	0,86	0,86	0,86	0,86	
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	
	EE	0,86	0,86	0,86	0,86	
Tres Arroyos	ETG	0,81	0,95	0,98	1,00	13,71
	ETP	0,83	0,95	1,00	1,00	4,00
	EE	0,98	1,00	0,98	1,00	3,43
Villalonga	ETG	0,69	0,69	0,69	0,69	
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	
	EE	0,69	0,69	0,69	0,69	

#### Referencias

	Eficiente
	Ineficiente
	Rendimiento creciente

Analizando la ciudad de Bahía Blanca, se observa que no registra cantidad de RSUR ( $O_r=0$ ) e igualmente, en los análisis A2, A3 y A4 ha obtenido la máxima eficiencia. Es decir, se hubiera esperado que la eficiencia sea menor a 1 por poseer el valor 0 en uno de los outputs. Lo que se concluye es que, al ser el valor de  $O$  tan elevado en comparación a los demás, así como, posee valores de inputs aparentemente optimizados a  $O$ , la gestión sigue resultando eficiente. Debido a esto es que posteriormente se decidió realizar un análisis exclusivo de los municipios que registraban valores mayores a 0 para  $O_r$  (el A5).

Observando los valores de eficiencia de escala (EE), se concluye que, en promedio, la pérdida de productividad por los efectos de la escala es del 20% en los análisis A1, A2, A3 y A4, y del 40% en A5. Todos los análisis demostraron el comportamiento de rendimientos creciente en las localidades ineficientes de los modelos CCR.

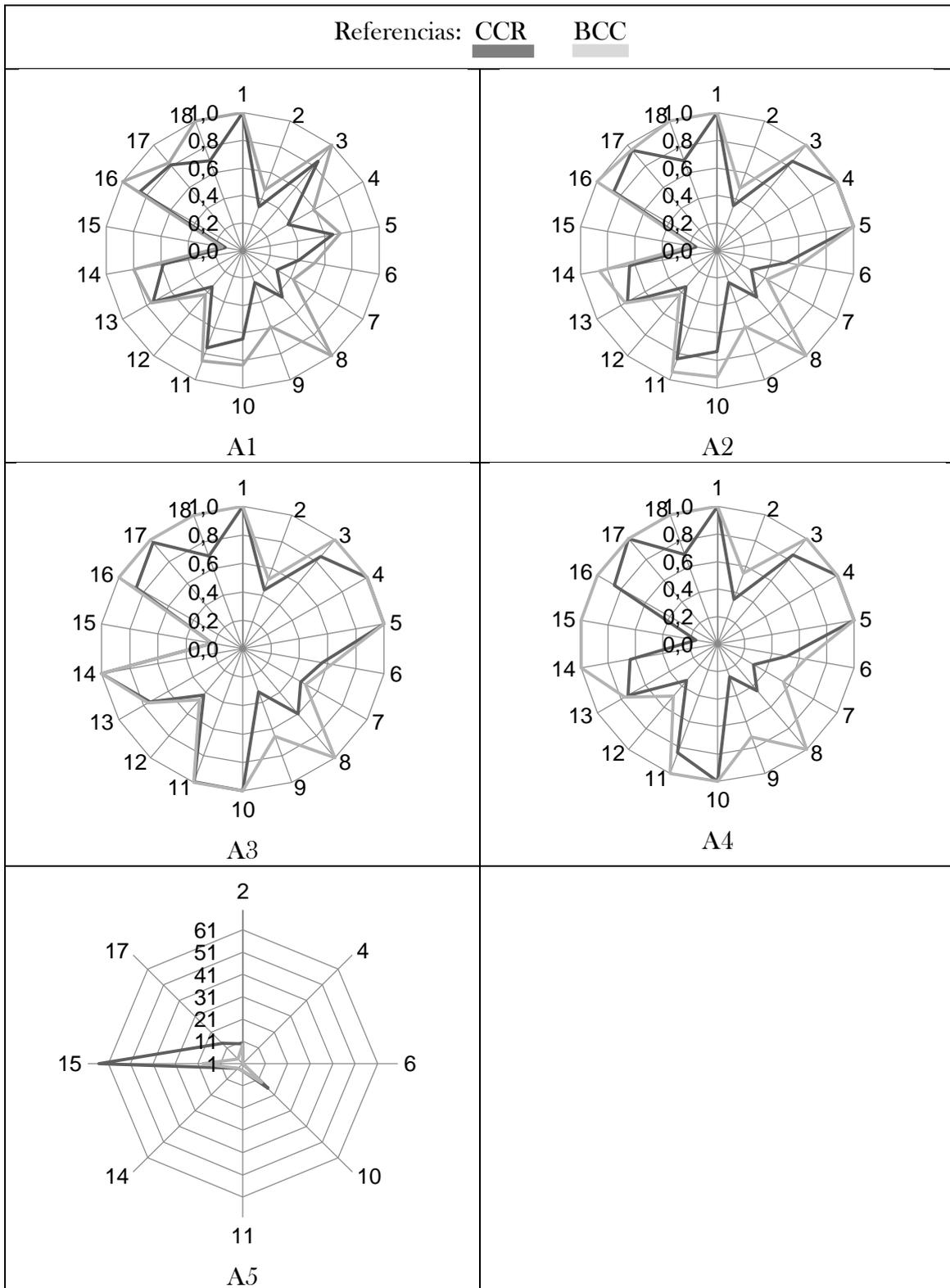


Figura 32. Conjunto de gráficos de red de las variaciones de eficiencia CCR y BCC según cada análisis.

Este resultado apoya la descripción realizada previamente respecto a que la GIRSU de los municipios del SOBA son gestiones bastante nuevas que están creciendo de a poco, con muchas cosas por hacer y mejorar, pero con presupuestos ajustados que limitan su accionar. Además, el pequeño tamaño de algunas localidades, dificulta el objetivo de

alcanzar los rendimientos de escala, ya que, por ejemplo, hay cantidades de recursos mínimos necesarios, que demandan una alta inversión, pero que, sin embargo, no son utilizados en su máxima capacidad por su baja demanda.

#### **5.1.4. Análisis de holguras**

En el capítulo 3 se explicó que, aunque una DMU obtenga el valor  $\theta=1$  puede ocurrir que aparezcan variables residuales o de holgura que indiquen que hay presencia de *inputs* u *outputs* que deberían reducirse o incrementarse, respectivamente. En dichos casos, según el criterio de Pareto-Koopmans (P-K), la DMU será ineficiente.

Observando los resultados obtenidos, dicha situación no se da en ningún caso. Sin embargo, se observó una DMU que, si bien la eficiencia no es 1, presenta un valor muy cercano (0,98) e igualmente se observan holguras muy elevadas. Esto es en el análisis A3-CCR, en la DMU 17 (Tres Arroyos), donde los valores de C, M y F, deben disminuir porcentualmente en 54,1 , 2,4 y 60 puntos respectivamente.

Por otro lado, el 24% de las DMUs ineficientes en los modelos BCC de los análisis A1, A2, A3 y A4, presentan holguras en inputs y outputs a la vez. Es decir, no basta solo con el incremento del output para lograr la eficiencia de P-K. En los modelos CCR, dicha situación se da en el 9% de los casos. En el análisis A5, en el modelo CCR, a pesar de ser orientado al output, las DMUs ineficientes demandan disminuciones en el *input* para ser eficientes.

#### **5.1.5. Análisis de sensibilidad**

Cómo se explicó en el Capítulo III, es necesario realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los modelos y el impacto que producen modificaciones en los datos de entrada. Para ello, se corrieron todos los modelos DEA nuevamente retirando de a una DMU por vez y registrando los resultados, de forma de comparar la variación en los valores de eficiencia de las restantes DMU. Se utilizó Matlab, adaptando los códigos de Restrepo & Villegas (2007) en un código cíclico que cumplía con el objetivo mencionado. Los resultados obtenidos se muestran el Anexo 1.

Luego de correr todos los modelos, se observó que sólo en 4 modelos ocurrían algunos cambios apreciables y solo al retirar una localidad en cada uno: Bahía Blanca en los análisis A1-CCR, A2-CCR y A4-CCR; y Stroeder en A1-BCC. En el A1-CCR, al retirar a Bahía Blanca, todos los municipios aumentan entre 14 y 52% sus eficiencias, y 4 se

convierten en eficientes. Esto puede apreciarse en el siguiente gráfico de caja de la Figura 33.

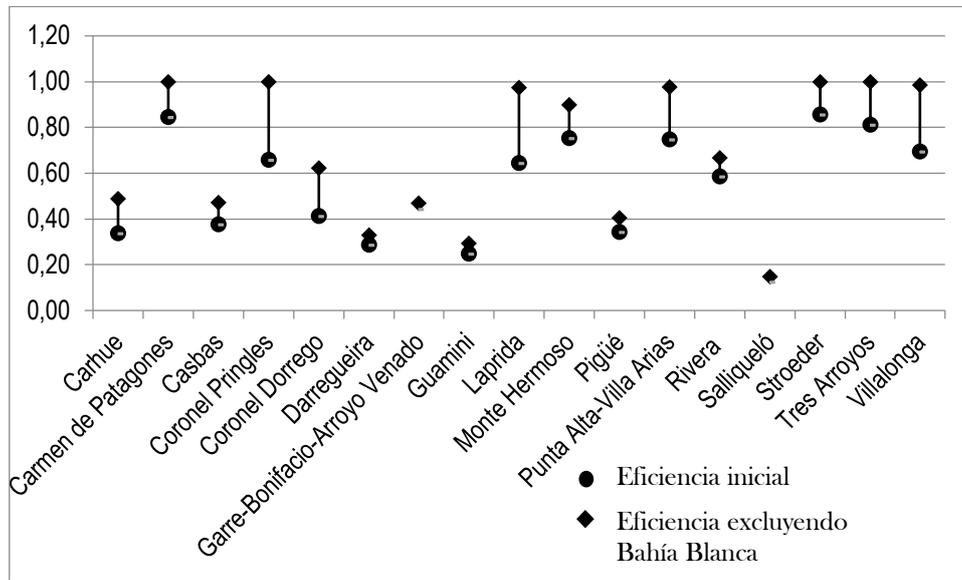


Figura 33. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A1-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis.

En A2-CCR, las variaciones son un poco menores, obteniéndose 11 localidades que aumentan su eficiencia entre 23 y 42% y 4 DMU obtienen  $\theta=1$ . Análogamente, en A4-CCR, 6 DMU aumentan su eficiencia entre 23 y 60%, y 4 DMUs se vuelven eficientes. Dichos análisis se observan en los gráficos de caja de la Figura 34 y Figura 35.

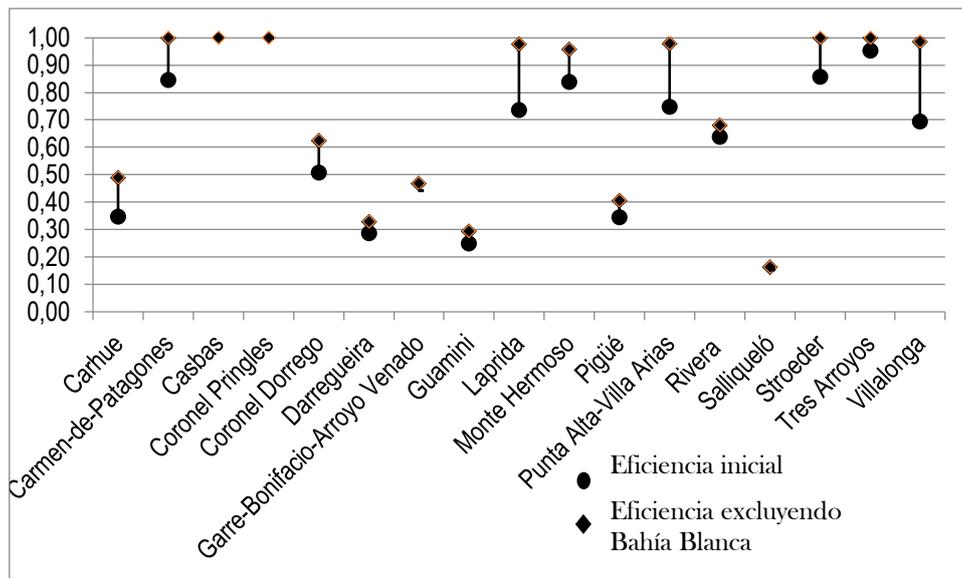


Figura 34. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A2-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis.

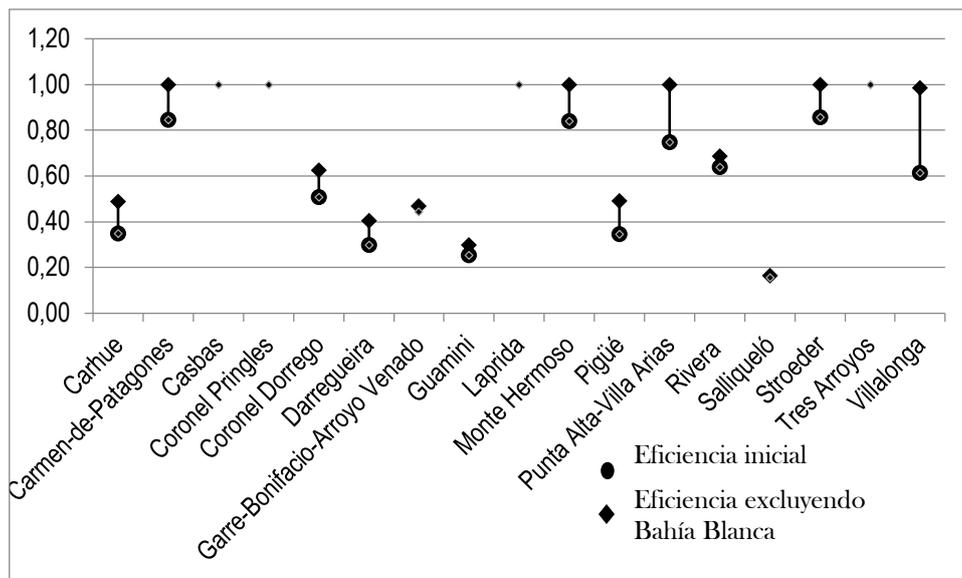


Figura 35. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A4-CCR al retirar la localidad de Bahía Blanca del análisis.

En el análisis A1-BCC, al retirar a Stroeder, todas las DMUs ineficientes aumentan su eficiencia entre 3 y 567% y 3 obtienen la máxima eficiencia. Los mayores aumentos los registran Darregueira con 54% y Saliquelló con 567%. Las variaciones se observan en la siguiente Figura 36.

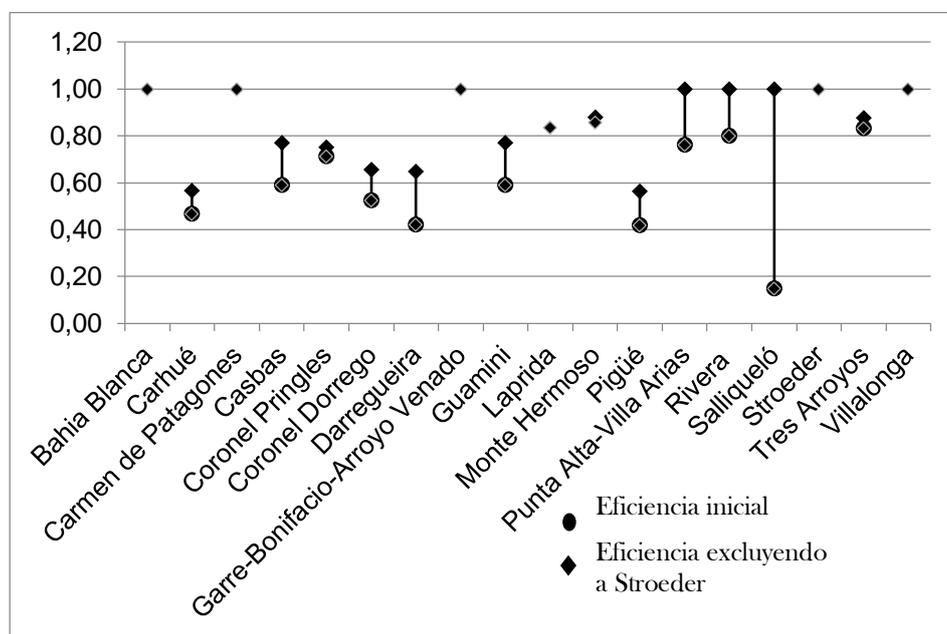


Figura 36. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA A1-BCC al retirar la localidad de Stroeder del análisis.

Ante dichos resultados, puede concluirse que los modelos son robustos ante las observaciones *outlier*.

### 5.1.6. Análisis de *Benchmark*

El resumen del análisis de *Benchmark* se muestra en la Tabla 31. En primer lugar, se contabilizó la cantidad de veces que cada localidad fue observada como referencia de otra localidad ineficiente, en todos los análisis realizados. En segundo lugar, sobre el total de las observaciones de referencias contabilizadas (218), se calculó el porcentaje de aparición de cada localidad, y por último, se calculó el porcentaje de aparición sobre el total de DMUs ineficientes en los 10 análisis hechos, es decir, 94 DMUs. Rápidamente puede verse que Bahía Blanca es el municipio que más veces sirve de *Benchmarking* a las demás localidades, ya que aparece en el conjunto de referencias en 78 (35,78%) observaciones, y absorbe el 82,98% de DMUs ineficientes. Por el contrario, Carhué, Coronel Dorrego, Darregueira, Guaminí, Monte Hermoso, Pigüé, Punta Alta-Villa Arias y Saliqueló no aparecen como referencia en ninguna ocasión.

Para un análisis más exhaustivo, se dividió el conteo de referencias entre los modelos de rendimientos constantes y de rendimientos variables. Los resultados se muestran en la Tabla 32 y Tabla 33. Se puede observar que en los modelos CCR, Bahía Blanca continua como referencia principal por una amplia diferencia, pero en los modelos BCC, Stroeder aparece casi a la par de Bahía Blanca.

Tabla 31. Resumen del análisis *Benchmark* en SOBA.

Todos los análisis	Frecuencia de referencia a otra DMU	% Sobre total de referencias	% Sobre total de ineficientes
Bahía Blanca	78	35,78	82,98
Stroeder	35	16,06	37,23
Carmen de Patagones	29	13,30	30,85
Villalonga	19	8,72	20,21
Casbas	16	7,34	17,02
Laprida	16	7,34	17,02
Coronel Pringles	14	6,42	14,89
Garre-Bonifacio-Arroyo Venado	6	2,75	6,38
Rivera	4	1,83	4,26
Tres Arroyos	1	0,46	1,06
Carhué	0	0,00	0,00
Coronel Dorrego	0	0,00	0,00
Darregueira	0	0,00	0,00
Guaminí	0	0,00	0,00
Monte Hermoso	0	0,00	0,00
Pigüé	0	0,00	0,00
Punta Alta-Villa Arias	0	0,00	0,00
Saliqueló	0	0,00	0,00

Tabla 32. *Benchmark* según modelos CCR SOBA

CCR	Frecuencia de referencia a otra DMU
Bahía Blanca	58
Stroeder	17
Carmen de Patagones	15
Casbas	11
Laprida	10
Coronel Pringles	9
Villalonga	5
Rivera	4
Tres Arroyos	1

Tabla 33. *Benchmark* según modelos BCC SOBA

BCC	Frecuencia de referencia a otra DMU
Bahía Blanca	20
Stroeder	18
Carmen de Patagones	14
Villalonga	14
Garre-Bonifacio-Arroyo Venado	6
Laprida	6
Casbas	5
Coronel Pringles	5

Para analizar la concentración de las DMUs de referencias, se realizó un gráfico de Pareto para cada modelo. En el caso de las referencias en modelos CCR (Figura 37), el 60% se concentra en 2 ciudades, y en el caso BCC, en 3 localidades (Figura 38). A partir de la ubicación 4, ambos gráficos se comportan de manera similar.

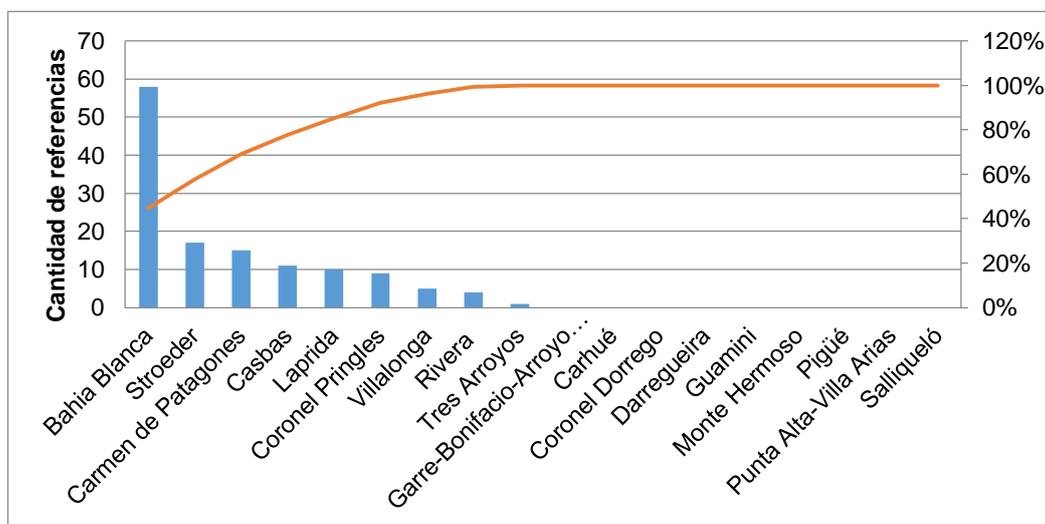


Figura 37. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias *benchmark* en los modelos CCR de SOBA

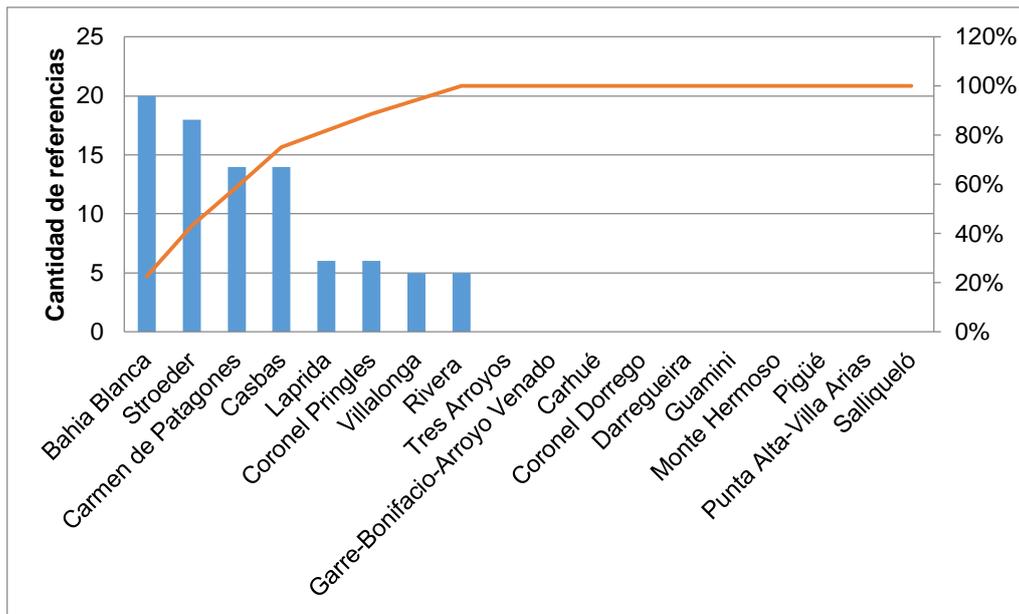


Figura 38. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias *benchmark* en los modelos BCC de SOBA. Por otro lado, se analizaron las localidades ineficientes de cada análisis y se registró la cantidad de veces que citaban a una misma DMU eficiente como referencia. En la Tabla 34 se muestran las localidades ineficientes en el eje vertical, y las DMUs de referencias más contabilizadas. En color rojo se resaltan los valores de conteo entre 5 y 8, en color amarillo los conteos iguales a 3 o 4, y en verde los iguales a 2 o 1. Es decir, se identificaron aquellas localidades cuyas referencias se focalizaban en reiterados análisis en una misma localidad, de manera de obtener información concreta de a qué municipio debe tener en vista la DMU ineficiente para mejorar sus rendimientos.

En la Tabla 35 se muestran la suma de las intensidades (valores de  $\lambda$  en los modelos duales) con que cada DMU ineficiente cita a la referencia en todos los análisis. Sólo se consideraron los conteos de mayores e iguales que 5, por ser los más significativos. En rojo se registran los valores mayores a 2,5, en amarillo valores entre 1,8-2,5 y en verde los menores a 1,8. Puede observarse como ante iguales cantidades de frecuencia, las intensidades pueden variar, como en el caso de Punta Alta-Villa Arias con Bahía Blanca y con Stroeder: para igual número de frecuencia (8), la suma de intensidades varía en casi 3 puntos. Asimismo, si bien, Bahía Blanca, que aparece como referente en la mayoría de los análisis, las intensidades que aporta son muy bajas, menores a 1.

Tabla 34. *Benchmark*. Conteo de referencias de las localidades ineficientes en SOBA

	Bahía Blanca	Carmen de Patagones	Casbas	Coronel Pringles	Garre-Bonifacio -Arroyo Venado	Laprida	Rivera	Stroeder	Villalonga
Carhué	6	7		3	2	5			5
Coronel Dorrego	7	1	4	6		3		4	5
Darregueira	4	6			2	4			2
Guaminí	4				4	1	4	7	2
Pigüé	6	7				3			2
Punta Alta-Villa Arias	8						1	8	
Salliqueló	6		5			3	2	3	

Tabla 35. *Benchmark*. Suma de intensidades en las relaciones de referencias en SOBA.

	Bahía Blanca	Carmen de Patagones	Casbas	Coronel Pringles	Garre-Bonifacio -Arroyo Venado	Laprida	Rivera	Stroeder	Villalonga
Carhué	0,07	0,63				1,85			2,20
Coronel Dorrego	0,10			0,34					1,95
Darregueira		0,84				2,31			
Guaminí								3,44	
Pigüé	0,12	2,86							
Punta Alta-Villa Arias	0,88							3,79	
Salliqueló	0,03		0,75						

### 5.1.7. Influencia de la densidad poblacional en la eficiencia

A partir de todos los valores de eficiencia obtenidos en los 8 análisis, se realizó un estudio de la correlación que podían tener dichas medidas con la densidad poblacional de cada localidad. Por ser la medida de eficiencia una variable ordinal, se utilizaron, los métodos Tau\_B de Kendall y Rho de Spearman para el cálculo de las correlaciones, en el software *IBM-SPSS Statistics 19*.

Como puede observarse en la Tabla 36, tanto para los modelos CCR como BCC, el *p*-valor obtenido no es significativo por ser mayor que 0,05, por lo que no indica correlación entre las variables.

Tabla 36. Análisis de correlación entre eficiencia y densidad poblacional en SOBA.

Asociación entre Eficiencia) y Densidad poblacional		Tau_b de Kendall	Rho de Spearman
CCR	Coefficiente de correlación	0,009	0,010
	Sig. (bilateral) - p-valor	0,914	0,935
BCC	Coefficiente de correlación	0,078	0,115
	Sig. (bilateral) - p-valor	0,389	0,334

Por otro lado, se realizaron modelos de regresión *Tobit* entre los valores de eficiencia obtenidos en cada modelo y la densidad poblacional, y otra regresión entre la eficiencia y la cantidad de habitantes.

La baja densidad de Monte Hermoso parece explicar una proporción de la ineficiencia en todos los análisis donde ha registrado  $\theta < 1$ . Dicha proporción varía entre 11 y 73%. Como ejemplo, se muestra en la Figura 39, la comparación de los valores de eficiencia según DEA y según el método *Tobit* utilizando a la densidad poblacional como variable explicativa en el análisis A1-BCC. En el mismo, el triángulo indica el marcador de Monte Hermoso. Observar que la eficiencia obtenida por DEA es mayor al valor predicho por el método *Tobit*, explicando que con la densidad presente en dicha DMU, el valor de eficiencia debería ser más bajo, o dicho en otras palabras, Monte Hermoso está operando más eficientemente de lo que su contexto y condiciones le permiten. La localidad de Stroeder, si bien registra buenos rendimientos, el análisis realizado muestra que la misma no ha alcanzado la máxima eficiencia, se registra que la baja densidad también explica una proporción de dicha ineficiencia.

Dentro de la densidad, se analizó independientemente la influencia de la cantidad de habitantes resultando en que la baja cantidad de habitantes de Monte Hermoso y Stroeder, también explican la ineficiencia en los análisis donde no han alcanzado el máximo valor de rendimiento.

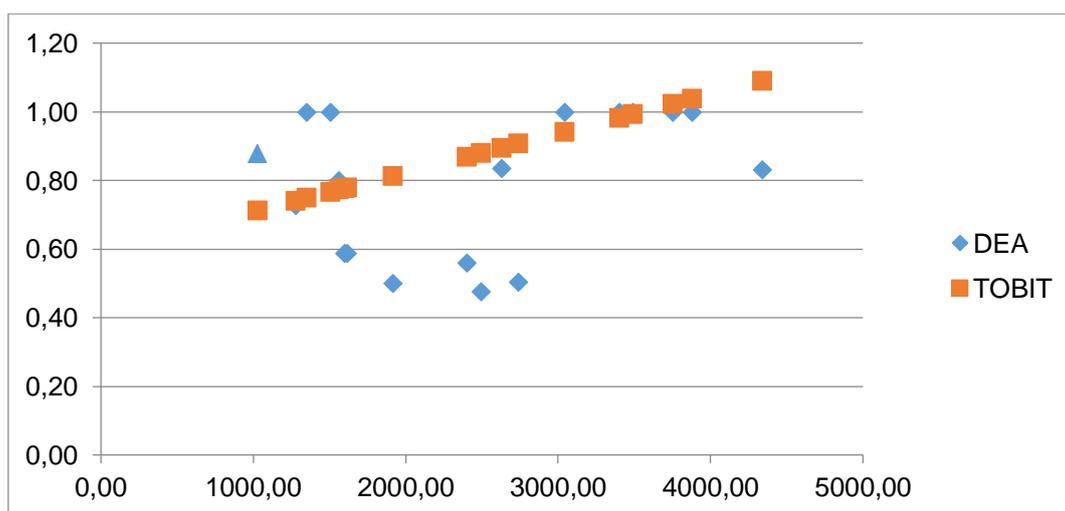


Figura 39. Valores de eficiencia según DEA y según método Tobit, considerando la densidad poblacional como variable explicativa en el análisis A1-BCC

## 5.2. Modelos DEA y resultados de eficiencia en Cataluña

A continuación, se presentan los modelos DEA definidos para el análisis de eficiencia relativa en Cataluña.

### 5.2.1. Elección y definición de subindicadores

La siguiente Tabla 37 indica los subindicadores seleccionados para utilizar como *inputs* y *outputs* en los análisis DEA en Cataluña, así como la forma de cómputo, la unidad de medida y el objetivo de los mismos.

Tabla 37. Subindicadores seleccionados para los análisis DEA en el SOBA.

Subindicador	Descripción	Forma de cómputo	Unidad de medida	Objetivos
<b>Capacidad de Camiones (C)</b>	Capacidad del total de camiones utilizados para recolectar los RSU.	Suma de las capacidades de los camiones recolectores de RSU utilizados.	M <sup>3</sup>	Optimizar la capacidad de los camiones en función de la generación de RSU. Optimizar recorridos y frecuencias.
<b>Personal (M)</b>	Horas de trabajo total del personal dedicado a la recolección de los RSU, es decir, personas que son transportadas por el camión recolector: conductor y recolectores manuales.	Sumatoria de las horas por semana trabajadas por el personal involucrado.	Horas por semana (hs/sem)	Optimizar el trabajo del personal involucrado en función de la generación de RSU, Optimizar recorridos y frecuencias.
<b>Frecuencia de recolección (F)</b>	Cantidad de veces que se recolecta RSU en un mismo sitio en una semana.	Ver Tabla 38	Veces por semana	Optimizar la frecuencia de recolección en función de la generación de RSU. Dicho objetivo no sólo tiene que ver con una cuestión de cálculos sino que también demanda el compromiso de los ciudadanos en cumplir con la rutina de colocar sus bolsas de basura en los cestos externos a sus vivienda en un horario y día predefinido, de forma de maximizar la organización de la recolección a través de la minimización de la frecuencia.
<b>Frecuencia de recolección Fracción reciclable i (Fr)</b>	Cantidad de veces recolectada la fracción i.			

<b>Capacidad de contenedores totales (N)</b>	Capacidad del total de los contenedores domiciliarios utilizados para contener los RSU.	Suma de las capacidades de los contenedores de papel, envases, vidrio, orgánico y resto.	M <sup>3</sup>	Optimizar la capacidad de los contenedores en función de la generación de RSU. Optimizar recorridos y frecuencias.
<b>Capacidad de contenedorFracción reciclables i (Nr)</b>	Capacidad de los contenedores de la fracción i.	Suma de los contenedores de la fracción i.		
<b>Cantidad de RSU contenerizado (Oc)</b>	Cantidad de RSU contenerizado (papel, envases, vidrio, orgánico y resto).	Sumatoria de los RSU recolectados durante un año.	t <sub>n</sub> /año	Estimar la cantidad de RSU generados por la población y determinar la capacidad necesaria de recursos para el sistema de gestión de RSU. El objetivo a largo plazo es que dicho indicador disminuya, esperando una disminución en la generación de RSU de la población.
<b>Cantidad de RSUR contenerizado (Orc)</b>	Cantidad de RSUR contenerizados (papel, envases, vidrio, y orgánico).	Sumatoria de los RSUR recolectados por el sistema de contenedores durante un año.	t <sub>n</sub> /año	Estimar la cantidad de RSUR generados por la población y determinar la capacidad necesaria de recursos para el sistema de gestión de RSUR. El objetivo a largo plazo es que dicho indicador aumente en el sentido que mejore la segregación de los RSU de los habitantes pero no por aumento de la generación de RSU.
<b>Cantidad de un residuo reciclable i recolectado (Or)</b>	Cantidad de un determinado residuo reciclable i recolectado: e=envases; p=papel/cartón; v=vidrio; o=orgánico.	Sumatoria de la fracción i recolectada durante un año.	t <sub>n</sub> /año	

Tabla 38. Conteo de veces que se realiza recolección en un mismo sitio<sup>15</sup>.

Ciudad	Frecuencia (veces/semana)					Frec. Total
	Orgánico	Papel/Cartón	Envases	Vidrio	Resto	
A	4	2,5	2,5	0,5	6	15,5
B	4	4	4	1	5	18

Para los análisis de eficiencia utilizando la herramienta DEA se tuvieron en cuenta distintos criterios según los *inputs*, *outputs* y objetivos buscados en cada modelo. En la Tabla 39 se observan los valores máximos, mínimos, media y desvío de cada una de las variables utilizadas en los modelos. La Tabla 40 muestran los 8 análisis realizados (A1,

<sup>15</sup> En Cataluña, dado que la frecuencia varía según cada tipo de fracción, se calcula la frecuencia total como la suma de las frecuencias de cada fracción. La tabla muestra dos ejemplos de cálculos de frecuencia para dos ciudades ficticias, A y B. En el SOBA al ser frecuencias mayoritariamente únicas, se considera directamente un solo valor.

A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8) sobre las 19 localidades de Cataluña, con el detalle de los *inputs*, *outputs* y objetivos considerados en cada caso. Asimismo, se indica el promedio de los valores de eficiencia obtenido para las modelos CCR, BCC e IRS (-I, orientado al input; -O, orientado al output), así como la cantidad de localidades eficientes y el valor de eficiencia mínimo obtenido.

Tabla 39. Valores máximos, mínimos, media y desvío de los subindicadores, a partir de los datos relevados en Cataluña

	C	F	M	N	D	Oc	Fr	Nr	Or			
<b>Max</b>	900	25,5	2268	14983	20000	83290,2	18,5	10533	18986,4			
<b>Min</b>	72	7,5	240	1167,04	6	5584,56	5	796,8	1271			
<b>Media</b>	236,17	17,17	862,09	5038,25	2754,04	28483,90	11,14	3317,06	6701,06			
<b>Desvío</b>	233,32	4,9401	532,64	3558,4	4571,33	23451,9	3,6213	2434,34	5505,95			
	Frp	Nrp	Orp	Fre	Nre	Ore	Frv	Nrv	Orv	Fro	Nro	Oro
<b>Max</b>	7	3188	83290,2	7	3187,5	83290,2	5	2133	83290,2	7	2025	83290,2
<b>Min</b>	1,25	288	5584,56	1,25	288	5584,56	0,25	188	5584,56	2	22,8	5584,56
<b>Media</b>	3,04	985,52	28483,9	3,12	960,16	28483,9	0,92	735,73	28483,9	4,05	622,5	28483,9
<b>Desvío</b>	1,4	749,7	23451,9	1,3	751,9	23451,9	1,1	480,3	23451,9	1,5	600,0	23451,9

Tabla 40. Modelos y resumen de resultados de los análisis DEA en Cataluña

Análisis	Inputs	Outputs	Objetivos del modelo	Modelo	Promedio	Cantidad de DMUs eficientes	Mínima Eficiencia
A1	C F M N	Oc	Minimizar los recursos considerando los RSU contenedorizados.	CCR-I	0,78	7	0,31
				BCC-I	0,99	17	0,83
				IRS-I	0,99	17	0,83
A2	C Fr M Nr	Orc	Minimizar los recursos considerando los RSUR contenedorizados.	CCR-I	0,71	5	0,32
				BCC-I	0,95	15	0,74
				IRS-I	0,95	15	0,74
A3	C Fr M Nr Oc	Orc	Maximizar los RSUR contenedorizados dados los recursos existentes y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,38	6	2,10
				BCC-O	1,08	15	1,62
				IRS-O	1,09	15	1,62
A4	Fr Nr Oc	Orc	Maximizar los RSUR contenedorizados dados los recursos exclusivos de los RSUR y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,57	3	3,05
				BCC-O	1,25	9	2,82
				IRS-O	1,27	9	2,82

A5	<u>Envases</u> Fr Nr Oc	Ore	Maximizar la cantidad de envases contenedorizados dados los recursos exclusivos de los envases y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,59	3	2,37
				BCC-O	1,25	8	1,71
				IRS-O	1,26	8	1,74
A6	<u>Papel/cartón</u> Fr Nr Oc	Orp	Maximizar la cantidad de papel/cartón contenedorizado dados los recursos exclusivos del papel/cartón y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,30	5	2,28
				BCC-O	1,09	12	1,55
				IRS-O	1,10	12	1,55
A7	<u>Vidrio</u> Fr Nr Oc	Orv	Maximizar la cantidad de vidrio contenedorizado dados los recursos exclusivos del vidrio y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,23	6	1,66
				BCC-O	1,16	10	1,58
				IRS-O	1,18	8	1,58
A8	<u>Orgánico</u> Fr Nr Oc	Oro	Maximizar la cantidad de material orgánico contenedorizados dados los recursos exclusivos de material orgánico y la cantidad de RSU generado.	CCR-O	1,81	7	7,65
				BCC-O	1,45	13	6,42
				IRS-O	1,45	13	6,42

Posteriormente se procedió a descomponer la ETG en ETP y EE para descubrir las causas de ineficiencia existentes. Asimismo, se identificaron los rendimientos de cada análisis siguiendo los tres pasos señalados previamente. En la siguiente Tabla 41 se muestran los valores de eficiencia ETG, ETP y EE obtenidos por cada localidad en cada análisis. Con el color verde en ETG, se aprecia rápidamente la máxima eficiencia y por lo tanto, se obtienen colores verdes para ETP y EE. Si ETG es ineficiente (<1, color gris) deben observarse los valores y colores de ETP y EE para explicar la causa de la eficiencia. Si ETP es gris, existe ineficiencia en los procesos utilizados. Si EE es celeste o bordó, existe una ineficiencia de escala: el celeste muestra rendimientos crecientes y el bordó rendimientos decrecientes. Por otro lado, el color marrón indica eficiencia con holguras (eficiente según el criterio de Farrel, pero ineficiente según P-K).

El conjunto de gráficos de la Figura 40, muestra como varían los valores de eficiencia de las localidades dentro del mismo análisis, según el tipo de rendimiento de escala considerado (constante, variable y creciente).

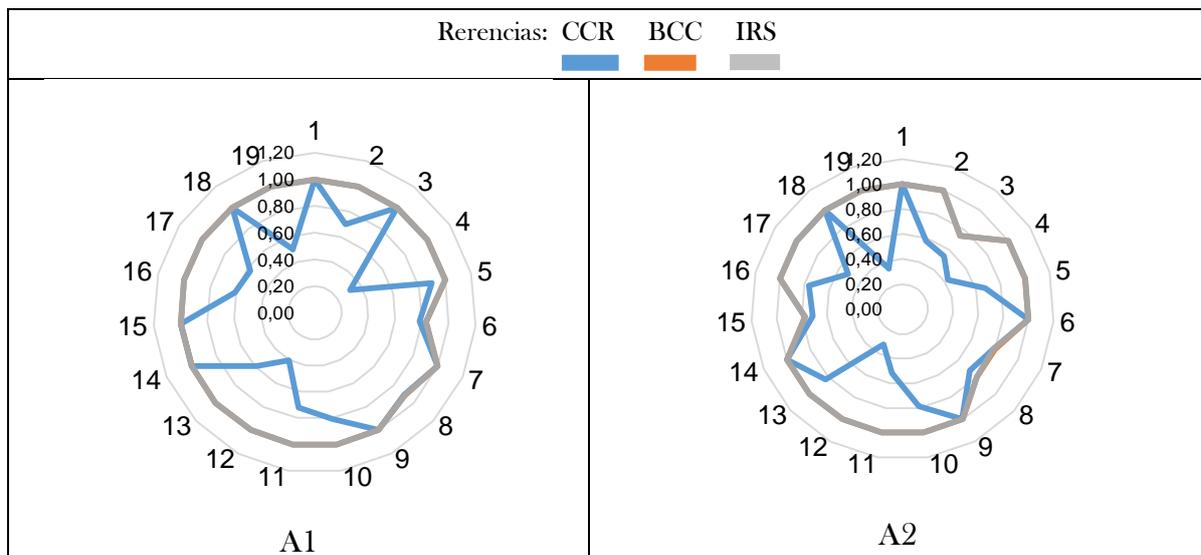
Tabla 41. Eficiencias obtenidas para cada localidad en cada análisis DEA realizado en Cataluña.

Localidad	Efic.	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Baix Ebre-Montsià (90)	ETG	1,00	1,00	1,00	1,08	1,01	1,00	1,00	1,26
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20
	EE	1,00	1,00	1,00	1,08	1,01	1,00	1,00	1,05
2. Barberà del Vallès (3954,3)	ETG	0,70	0,58	1,73	1,73	1,81	2,14	1,57	1,00
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,57	1,00
	EE	0,70	0,58	1,73	1,73	1,81	2,14	1,00	1,00
3. Castelldefels (5000)	ETG	1,00	0,54	1,86	3,05	1,67	1,51	1,22	7,65
	ETP	1,00	0,74	1,62	2,82	1,35	1,39	1,03	6,42
	EE	1,00	0,73	1,15	1,08	1,24	1,09	1,19	1,19
4. Conca Barbera (31,1)	ETG	0,31	0,43	1,18	1,18	1,48	1,07	1,00	1,38
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EE	0,31	0,43	1,18	1,18	1,48	1,07	1,00	1,38
5. Gavà (1300)	ETG	0,90	0,68	1,48	1,53	1,96	1,50	1,45	1,00
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,09	1,38	1,03	1,22	1,00
	EE	0,90	0,68	1,48	1,40	1,42	1,45	1,19	1,00
6. Girona (2494,5)	ETG	0,78	1,00	1,00	1,00	1,33	1,00	1,00	1,00
	ETP	0,83	1,00	1,00	1,00	1,30	1,00	1,00	1,00
	EE	0,94	1,00	1,00	1,00	1,02	1,00	1,00	1,00
7. Hospitalet de Llobregat (20000)	ETG	1,00	0,79	1,27	1,92	1,74	1,50	1,12	1,59
	ETP	1,00	0,81	1,18	1,43	1,51	1,20	1,00	1,41
	EE	1,00	0,97	1,08	1,34	1,15	1,25	1,12	1,13
8. Lleida (650)	ETG	0,91	0,72	1,38	1,45	1,80	1,17	1,44	1,00
	ETP	0,91	0,80	1,37	1,45	1,60	1,02	1,26	1,00
	EE	1,00	0,90	1,01	1,00	1,12	1,15	1,14	1,00
9. Mataró (5396)	ETG	1,00	1,00	1,01	1,39	1,70	1,61	1,26	1,19
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,37	1,63	1,55	1,19	1,18
	EE	1,00	1,00	1,01	1,02	1,04	1,04	1,06	1,01
10. Mollet del Vallès (4796)	ETG	0,81	0,79	1,26	1,46	1,41	1,22	1,30	1,00
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,05	1,25	1,01	1,30	1,00
	EE	0,81	0,79	1,26	1,39	1,12	1,21	1,00	1,00
11. Olesa de Montserrat (1417,8)	ETG	0,72	0,51	1,94	2,02	1,79	2,28	1,66	1,00
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,58	1,00
	EE	0,72	0,51	1,94	2,02	1,79	2,28	1,05	1,00
12. Pallar Jussà (6)	ETG	0,40	0,32	2,04	2,09	2,32	1,54	1,25	2,08
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,46	1,00	1,00
	EE	0,40	0,32	2,04	2,09	2,32	1,05	1,25	2,08
13. Pla d'Urgell (120,3)	ETG	0,59	0,83	1,01	1,01	1,00	1,05	1,02	1,08
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EE	0,59	0,83	1,00	1,00	1,00	1,05	1,02	1,08
14. Prat del Llobregat (2006)	ETG	1,00	1,00	1,00	1,46	1,64	1,14	1,40	1,50
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,29	1,40	1,02	1,31	1,36
	EE	1,00	1,00	1,00	1,13	1,17	1,12	1,07	1,10

15. Reus (1953,2)	ETG	1,00	0,71	1,40	1,64	1,43	1,00	1,58	2,90
	ETP	1,00	0,77	1,40	1,56	1,26	1,00	1,58	2,90
	EE	1,00	0,93	1,00	1,05	1,14	1,00	1,00	1,00
16. Ripollès (26,5)	ETG	0,61	0,77	1,23	1,35	1,54	1,00	1,03	1,06
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,24	1,38	1,00	1,00	1,00
	EE	0,61	0,77	1,23	1,09	1,12	1,00	1,03	1,06
17. Solsones (13,3)	ETG	0,57	0,51	1,41	1,41	1,30	1,02	1,00	1,01
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EE	0,57	0,51	1,41	1,41	1,30	1,02	1,00	1,01
18. Terrassa (3066)	ETG	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EE	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
19. Val d'Aran (15,7)	ETG	0,51	0,34	2,10	2,10	2,37	1,04	1,00	4,67
	ETP	1,00	1,00	1,00	1,41	1,71	1,00	1,00	1,00
	EE	0,51	0,34	2,10	1,49	1,39	1,04	1,00	4,67

#### Referencias

	Eficiente
	Ineficiente
	Rendimiento creciente
	Rendimiento decreciente



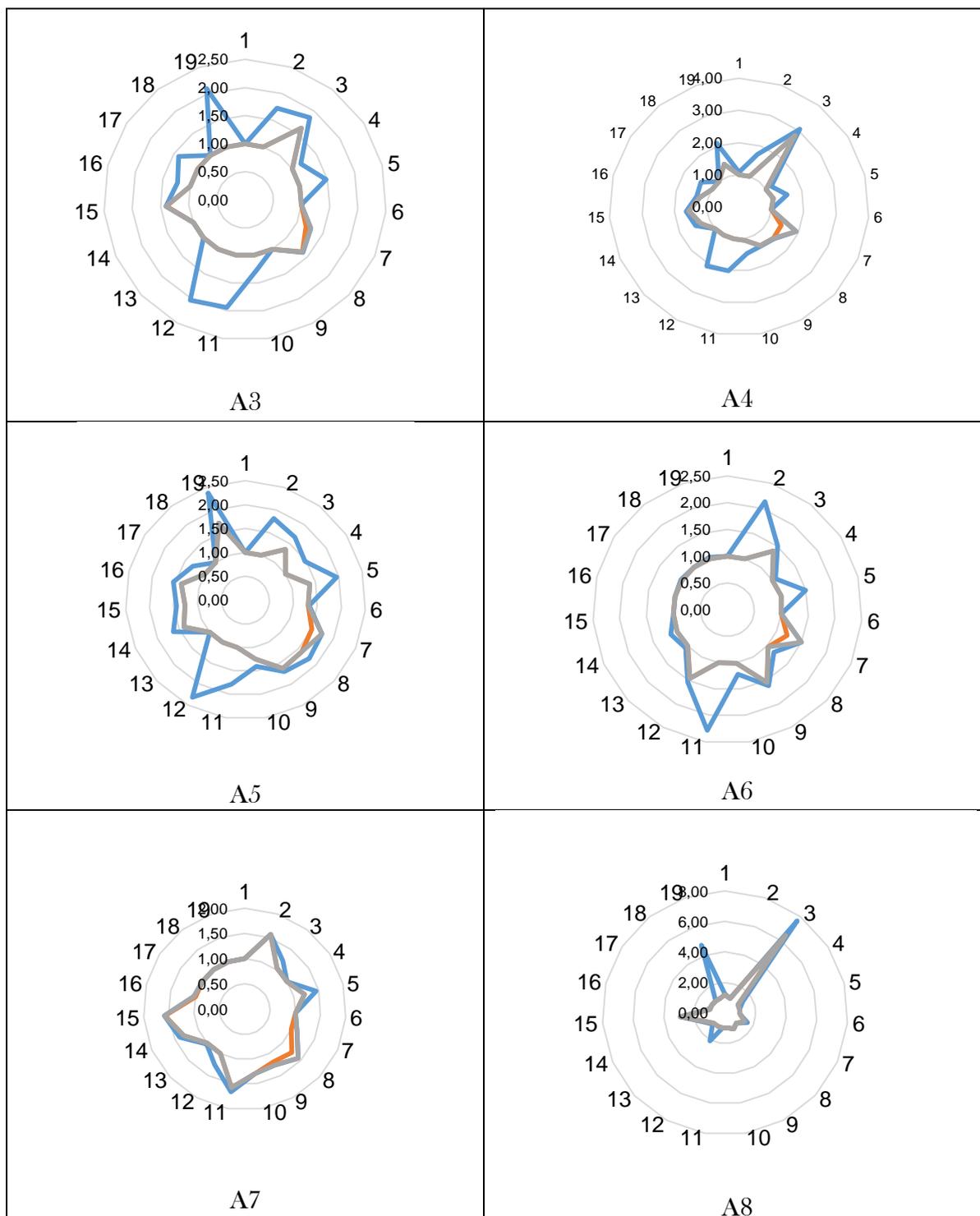


Figura 40. Conjunto de gráficos de red de las variaciones de eficiencia CCR, BCC e IRS según cada análisis en Cataluña.

### 5.2.2. Análisis de los resultados de eficiencia

Observando la Tabla 41 en detalle puede verse que Terrasa ha sido el único municipio que ha resultado eficiente de escala constante en todos los análisis. Asimismo, Conca de Barberá, Plat d'Urgell y Solsonés dieron valores de  $\theta=1$  en todos los análisis variando entre rendimientos contantes y variables, mientras que Baix Ebre, Barberá del Vallés,

Olesa y Pallar Jusá presentan una situación parecida a la descrita para las localidades mencionadas previamente, exceptuando un valor de eficiencia distinto de uno en alguno de los análisis. Por el contrario, los peores desempeños se encuentran en Hospitalet de Llobregat y Lleida quienes solo resultaron eficientes en un análisis, y Reus (2 análisis con  $\theta=1$ ) y Mataró (con 3 resultados eficientes).

En relación a los resultados de los modelos orientados al input (Análisis 1 y 2), se observan buenos valores de eficiencia en el total de las localidades, dado por promedios de  $\theta$  mayores a 0,71, respaldado en que solo dos localidades resultaron ineficientes en el análisis 1, y 4 en el 2, pero con valores de  $\theta$  mayores a 0,74. Estos números demuestran que las políticas aplicadas en los municipios están relacionadas con minimizar costos respecto a la inversión en recursos. Además los estudios realizados por los gestores resultan en optimización de recursos, evitando recursos ociosos y disminución de la eficiencia.

Respecto a los modelos orientados al output (Análisis 3 a 8) en primera instancia cabe aclarar cuál es el significado de dicha orientación. Dado que los municipios no tienen incidencia directa sobre la cantidad a recolectar, ya que depende en mayor medida de la buena o mala separación en origen que realicen los ciudadanos, decir que se desea maximizar el output significa que, dada la cantidad de recursos existentes y la generación de RSU de la población, la DMU en cuestión debería estar recuperando mayor cantidad de materiales, en comparación con las demás DMUs. Es decir, se plantea desde una recomendación en vez de como una sanción a la ineficiencia. Desde ya que para poder cumplir con dicho aumento en el output se deben tomar decisiones y acciones externas a los recursos planteados como input, por ejemplo, mayor sensibilización en la sociedad, políticas de inventivos, etc.

Observando los valores de los modelos orientados al output, el análisis 3 fue el que mejor indicadores registró, con 15 localidades eficientes en rendimientos variables. Cabe aclarar que la cantidad de inputs considerados en dicho modelo puede producir una relajación en el análisis que resulte en un “equilibrado” más flexible a la hora de determinar las DMU eficientes. Esto puede demostrarse al compararlo con el análisis 4, donde se quitan 2 inputs del análisis 3, y aparecen menos DMUs eficientes (9 en BCC). Respecto a la recolección específica de residuos reciclables, en cuestión de cantidad de localidades eficientes, el análisis de los RO demostró mayor cantidad (13 localidades con BCC),

luego el papel y cartón (12), luego el vidrio (con 10) y por último los envases con 8 DMUs eficientes. Sin embargo, observando los valores promedio de  $\theta$ , el análisis de RO es el peor rankeado ya que ciudades como Castelldefels y Reus arrojaron valores de eficiencia de 6,42 y 2,9 respectivamente.

### **5.2.3. Análisis de resultados de los rendimientos de escala**

Observando los valores de eficiencia de escala (EE), se concluye que, en promedio, la pérdida de productividad por los efectos de la escala es del 15%. Del total de los 152 valores de eficiencia obtenidos, el 30,3% presentó rendimientos constantes de escala. Del restante 69,7% que indicó rendimientos variables, el 92,5% fueron crecientes de escala y 7,5% decrecientes. Si se analizan los datos totales, el 30,3% indicó CCR, 64,5% para IRS y 5,3 con DRS.

Como puede observarse, en la gran mayoría de los análisis de cada localidad se obtienen rendimientos de escala crecientes. Esto indicaría que, con pequeñas acciones e incrementos de los recursos, puede aumentarse el nivel de RSU recolectados más que proporcionalmente en relación al aumento de los recursos. Podrían ubicarse más contenedores para aumentar y mejorar el alcance a los ciudadanos, de forma de que recorran menos distancias hasta la disposición de sus RSU, lo cual seguramente los motive a una mejor separación en origen. Del mismo modo, aumentar las campañas de concientización y los programas de incentivos a la separación en origen, podrían contribuir a un aumento considerable en la recolección de RSUR.

Por el contrario, dentro de las localidades con DRS, es interesante ver el caso de Hospitalet de Llobregat. La misma ha sido una de las pocas localidades que resultaron eficiente a rendimientos constantes en el análisis N°1. Es decir, al considerar el sistema en general, la gestión opera eficientemente. Sin embargo, al considerar más específicamente las fracciones reciclables, el municipio muestra valores ineficientes, inclusive con rendimientos variables, registrando rendimientos decrecientes en 6 de los 8 análisis realizados. Una de las principales causas puede deberse a la alta densidad poblacional que posee (20.000 hab/km<sup>2</sup>), lo cual demanda que el sistema de recolección sea de gran escala y complejo en términos de grandes volúmenes de recursos y de RSU recolectados. Es decir, las posibles ventajas que podrían significar una mayor densidad poblacional, se convierten en obstáculos a la hora de pensar en expandir el sistema, ya que deben analizarse decisiones que implican grandes inversiones para que realmente el impacto sea

considerable. Dicho en otras palabras, para poder aumentar la recolección de residuos reciclables, la gestión debe aumentar sus recursos más que proporcionalmente en relación al aumento de RSUR que podría obtenerse. Da la impresión de una saturación del sistema en el cual las políticas de incentivos aplicadas, las campañas de concientización y los recursos utilizados han “tocado techo” y muestran que de ellos no puede obtenerse una mejor recuperación de residuos reciclables.

#### 5.2.4. Análisis de sensibilidad

El procedimiento utilizado para realizar el análisis de sensibilidad en Cataluña se realizó análogamente a lo explicado la sección del SOBA. Se observó que sólo en los análisis A5-CCR, A5-BCC, A6-CCR y A7-CCR, ocurrían modificaciones apreciables en los valores de eficiencia y sólo en la retirada de una localidad. En el A5-CCR, al suprimir a Terrassa, las localidades de Barberá del Vallés, Castelldefels, Gavá, Girona, Hospitalet de Llobregat, Lleida, Mataró, Prat del Llobregat y Reus, mejoran sus rendimientos entre un 25% y 44%. Luego, Mollet del Vallet, Olesa, Ripolles y Val d´Aran lo hacen entre 10 y 20%. En el mismo DEA modelo BCC, las localidades modificadas se mantienen, aunque en porcentajes menores de aumento de eficiencia, quedando sólo Hospitalet, Lleida y Mataro con mejoras de alrededor de 37%. Dichas modificaciones pueden apreciarse en los siguientes gráficos de caja (Figura 41 y Figura 42).

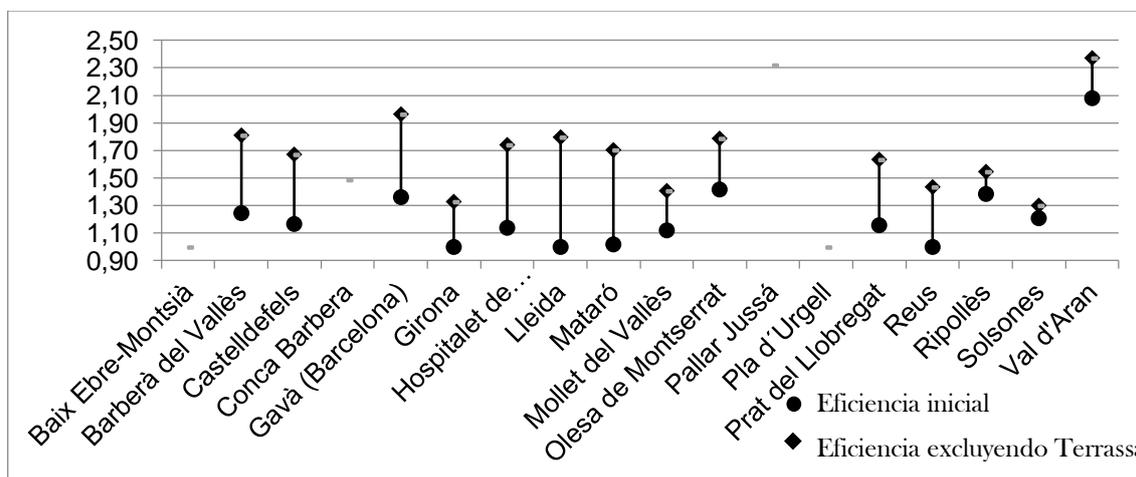


Figura 41. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 5-CCR al retirar la localidad de Terrassa del análisis.

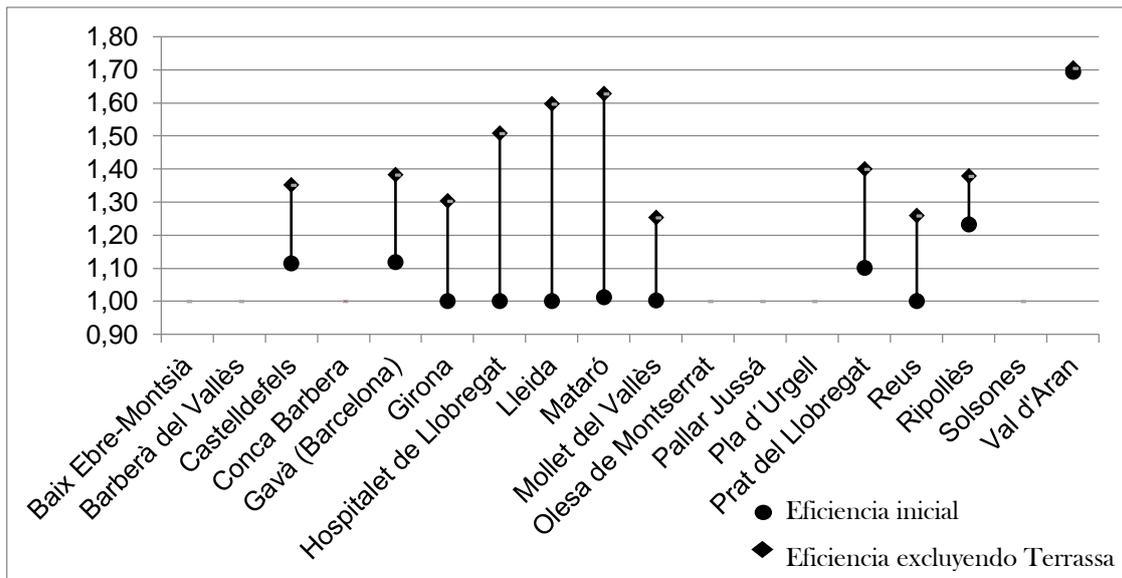


Figura 42. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 5-BCC al retirar la localidad de Terrassa del análisis.

En el análisis A7-CCR (Figura 43), al quitar a Girona del análisis, los municipios de Castelldefels, Lleida, Mataró Mollet del Vallet y Prat del Llobregat mejoran sus rendimientos en valores entre 8 y 11%. Y en el caso del análisis A6-CCR (Figura 44), el impacto sólo se produce sobre Mollet y Olesa en un aumento de la eficiencia del 10%.

Ante dichos resultados, puede concluirse que los modelos son robustos ante las observaciones *outlier*,

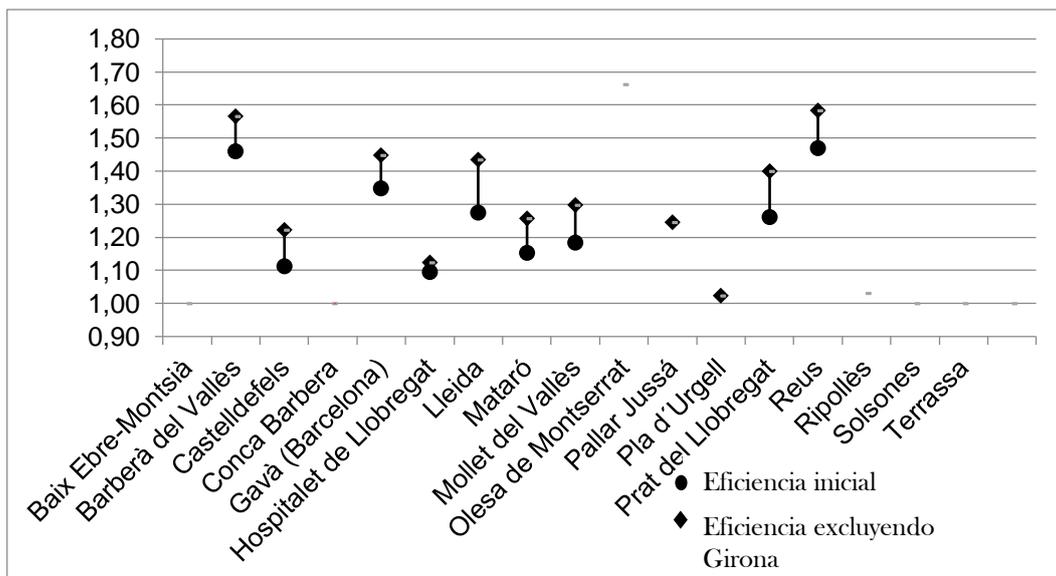


Figura 43. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 7-CCR al retirar la localidad de Girona del análisis.

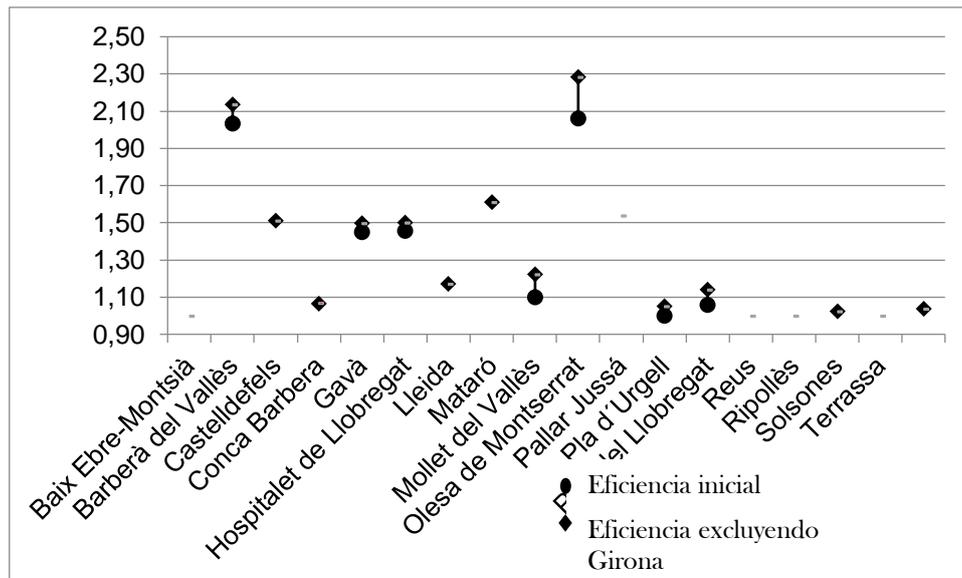


Figura 44. Gráfico de caja de las variaciones en las medidas de eficiencia del modelo DEA 6-CCR al retirar la localidad de Girona del análisis.

### 5.2.5. Análisis de Holguras

Luego de realizar los 8 análisis DEA, en las modalidades CCR y BCC, y obtener los valores de eficiencia para cada localidad, se prosiguió a estudiar las holguras obtenidas en cada caso. Las mismas se muestran en los ANEXOS 5 y 6, donde se las ordenó según los análisis y según los inputs y outputs.

Observando los resultados obtenidos, no se da ninguna situación que refleje ineficiencia por holguras (según la condición de P-K). Sin embargo, hay casos en los que el valor de  $\theta$  es muy cercano a 1 pero las holguras son relativamente grandes. En la Tabla 98, Tabla 101 y

Tabla 102, se muestran dichas situaciones en color naranja. En el A3-CCR (Tabla 98), Mataró posee una eficiencia igual a 1,004, indicando que debería aumentar el nivel de output en 0.4%, pero al analizar los valores de holgura en los inputs se observa que debe disminuir en un 23,5% su capacidad de camiones de recolección y en un 28,8% la cantidad de RSU. En el caso de Pla d'Urgell, en el mismo análisis con valor de eficiencia 1,001, posee holguras en todos sus inputs, menos en la cantidad de RSU y en A4-CCR, debería disminuir en 8,6% y en 56,8% la frecuencia de recolección y la capacidad de contenedores de RSUR respectivamente (Tabla 101). Por su parte, en el A5-CCR (

Tabla 102), la comarca de Baix Ebre y Montsià también registra  $\theta=1,01$  pero debería disminuir en un 39,7% su capacidad de contenedores para envases.

Por otro lado, la mayoría de las DMUs ineficientes en los modelos orientados al output, presentan holguras en inputs y outputs a la vez. Es decir, no basta solo con el incremento del output para lograr la eficiencia de P-K. No sucede lo mismo en los modelos orientados al inputs, donde las holguras se registran sólo en los inputs.

#### 5.2.6. Análisis de Benchmark

El resumen del análisis de *Benchmark* se muestra en la Tabla 42. En primer lugar, se contabilizó la cantidad de veces que cada localidad fue observada como referencia de otra localidad ineficiente, en todos los análisis realizados. En segundo lugar, sobre el total de las observaciones de referencias contabilizadas (396), se calculó el porcentaje de aparición de cada localidad, y por último, se calculó el porcentaje de aparición sobre el total de DMUs ineficientes en los 16 análisis hechos, es decir, 169 DMUs. Rápidamente puede verse que Girona y Terrassa son los municipios que más veces sirven de Benchmarking a las demás localidades, ya que aparecen en el conjunto de referencias en 110 (27,78%) y 90 (22,73%) observaciones respectivamente, y absorben el 65,09% y 53,25% de DMUs ineficientes. Por el contrario, Hospitallet de Lobregat, Lleida y Pallar Jutsá aparecen como referencia en 1 o ninguna ocasión.

Para un análisis más exhaustivo, se dividió el conteo de referencias entre los análisis de rendimientos constantes y de rendimientos variables. Los resultados se muestran en las Tabla 43 y Tabla 44. Se puede observar que en ambos análisis los 2 primeros puestos coinciden con el análisis global, con la diferencia que en los modelos BCC, Terrassa es quien presenta la mayor cantidad de referencias. Otra diferencia interesante es que en los modelos CCR, aproximadamente el 60% de las referencias se concentran en las localidades mencionadas, mientras que en los modelos BCC, las referencias se distribuyen más equiparadamente, alcanzando el 60% entre 4 municipios (Terrassa, Girona, Pla d'Urgell y Solsones). Dicha observación puede visualizarse de forma clara en los gráficos de Pareto (Figura 45 y Figura 46) realizados para cada uno de los grupos de análisis. Asimismo, cabe destacar que todas las localidades (excepto Terrassa y Baix Ebre-Monsia) tienen como referencia a Girona en el 50% o más de los análisis CCR.

Tabla 42. Resumen *benchmark* en Cataluña

	Frecuencia de referencia a otra DMU ineficiente	% Sobre total de referencias	% Sobre total de DMUs ineficientes
Girona	110	27,78	65,09
Terrassa	90	22,73	53,25
Baix Ebre y Montsià	28	7,07	16,57
Pla d'Urgell	28	7,07	16,57
Solsones	27	6,82	15,98
Prat del Llobregat	18	4,55	10,65
Olesa de Montserrat	17	4,29	10,06
Barberà del Vallès	15	3,79	8,88
Reus	13	3,28	7,69
Mataró	11	2,78	6,51
Ripollès	11	2,78	6,51
Mollet del Vallès	10	2,53	5,92
Conca Barbera	9	2,27	5,33
Val d'Aran	3	0,76	1,78
Castelldefels	2	0,51	1,18
Gavà	2	0,51	1,18
Hospitalet de Llobregat	1	0,25	0,59
Lleida	1	0,25	0,59
Pallar Jussà	0	0,00	0,00

Por otro lado, se analizaron las localidades ineficientes de cada análisis y se registró la cantidad de veces que citaban a una misma DMU eficiente como referencia. En la Tabla 45 se muestran las referencias más significativas de dicha contabilización, indicando entre paréntesis, la cantidad de análisis en donde la DMU ineficiente cito a la localidad mencionada como referencia. Es decir, se identificaron aquellas localidades cuyas referencias se focalizaban en reiterados análisis en una misma localidad, de manera de obtener información concreta de a qué municipio debe tener en vista la DMU ineficiente para mejorar sus rendimientos. Es por eso que, sólo se muestran resultados para 8 localidades, ya que en las demás las referencias eran muy dispersas y no podía concluirse en una o dos DMUs de referencia concreta.

Tabla 43. Frecuencias de DMU de referencias en modelos CCR en Cataluña.

Análisis CCR	Frecuencia de referencia a otra DMU
Girona	79
Terrassa	50
Baix Ebre-Montsià	21
Prat del Llobregat	12
Mataró	9
Solsones	9
Pla d'Urgell	8
Reus	8
Ripollès	6
Conca Barbera	5
Mollet del Vallès	5
Barberà del Vallès	1
Olesa de Montserrat	1
Castelldefels	0
Gavà	0
Hospitalet de Llobregat	0
Lleida	0
Pallar Jussà	0
Val d'Aran	0

Tabla 44. Frecuencias de DMU de referencias en modelos BCC en Cataluña

Análisis BCC	Frecuencia de referencia a otra DMU
Terrassa	33
Girona	31
Pla d'Urgell	17
Solsones	15
Barberà del Vallès	14
Olesa de Montserrat	14
Baix Ebre-Montsià	6
Ripollès	5
Conca Barbera	4
Mollet del Vallès	4
Prat del Llobregat	3
Reus	3
Mataró	2
Val d'Aran	2
Gavà	1
Castelldefels	0
Hospitalet de Llobregat	0
Lleida	0
Pallar Jussà	0

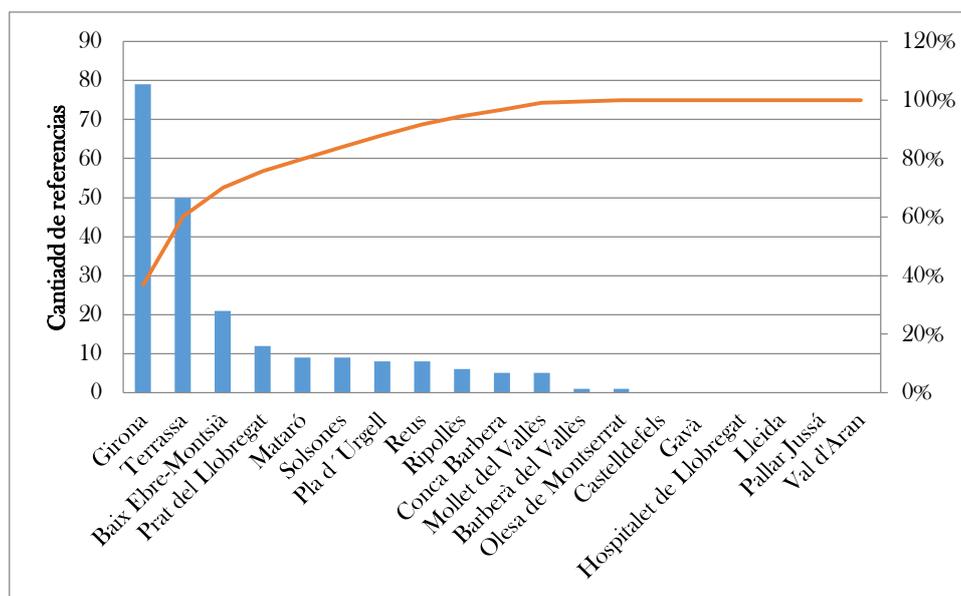


Figura 45. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias *benchmark* en los modelos CCR en Cataluña.

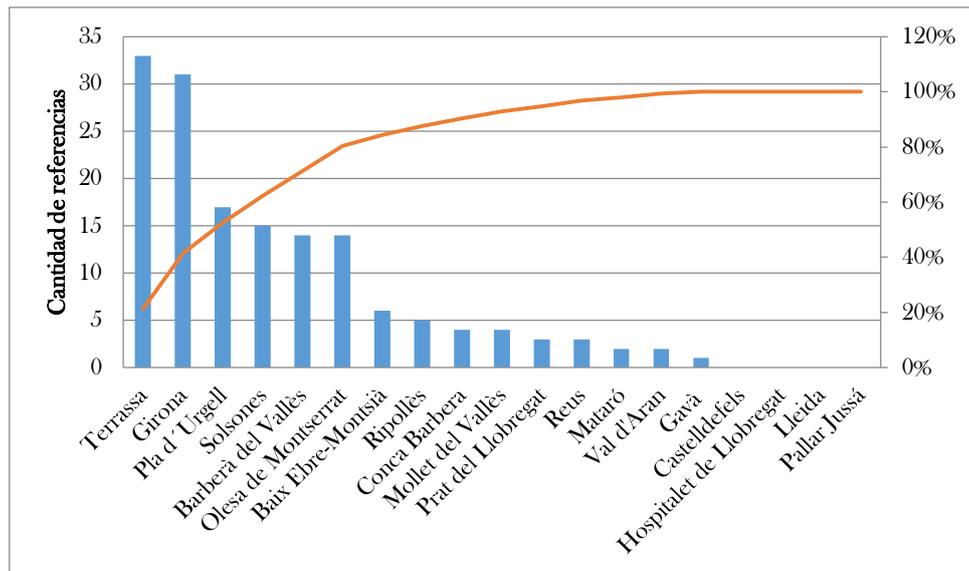


Figura 46. Gráfico de Pareto de la distribución de referencias *benchmark* en los modelos BCC en Cataluña. En la tercera columna de dicha tabla se muestra el porcentaje de dichas ocurrencias sobre el total de análisis realizados (18), y en la cuarta columna, el porcentaje sobre el total de veces que la DMU ineficiente citó a la eficiente como referencia. Por último, en la quinta columna se tuvieron en cuenta las intensidades de las referencias (valores de  $\lambda$  en los modelos duales), y se calculó el porcentaje de la suma de los valores de intensidad de las referencias mencionadas sobre el total de la sumatoria de todas las intensidades registradas en la DMU ineficiente. Puede observarse como ante iguales cantidades de frecuencia, las intensidades pueden ser muy distintas, como en el caso de Castelldefels con Girona y Gavà con Terrassa: para igual número de frecuencia (9), el porcentaje sobre el total de referencias presenta una diferencia de casi 10 puntos, en tanto que el porcentaje de intensidad varía en más de 20 puntos. Asimismo, si bien, para Gavà, Girona aparece menos veces como referencia que Terrassa, la intensidad de Girona es mayor que Terrassa.

Tabla 45. Principales *benchmark* para localidades ineficientes en Cataluña

DMUs ineficientes	Referencias principales	% sobre total de análisis	% sobre total de referencias	% de intensidades totales
Castelldefels	Girona (9)	50	28,1	33,9
Gavà	Terrassa (9); Girona (5)	50 ; 30	37,5 ; 20,8	11,3 ; 14,5
Hospitalet de Llobregat	Girona (9)	50	36	30,6
Lleida	Terrassa (14); Girona (9)	77,8 ; 50	35,9 ; 23,1	44,1 ; 31,6
Mataró	Terrassa (10); Girona (10)	55,6 ; 55,6	32,3 ; 32,3	33,5 ; 35,7
Mollet del Vallès	Girona (8)	44,4	28,6	28,9
Prat del Llobregat	Girona (8)	44,4	28,6	29,2
Reus	Girona (9)	50,0	36	42,2

### 5.2.7. Influencia de la densidad poblacional en la eficiencia

A partir de todos los valores de eficiencia obtenidos en los 8 análisis se realizó un estudio de la correlación que podían tener dichas medidas con la densidad poblacional de cada localidad. El análisis se dividió en dos grupos: el primero incluye a los análisis DEA 1 y 2, y el segundo los DEA del 3 al 8. Esta consideración fue efectuada dado que los primeros contienen información general del sistema y son orientados al input, mientras que los del segundo grupo, poseen información específicamente de la recuperación de residuos reciclables y son orientados al output.

Como puede observarse en la Tabla 46, en el primer grupo, el *p-valor* obtenido por ambos métodos no es significativo por ser mayor que 0,05, por lo que no indica correlación entre las variables. En el Grupo 2, el *p-valor* igual a cero, muestra una correlación significativa al nivel de 0,01. La intensidad es media, dado por el coeficiente de correlación que ronda los 0,3 puntos. Esto quiere decir que las localidades de mayores densidades están arrojando valores de  $\theta$  mayores, es decir, peores valores de eficiencia.

Tabla 46. Análisis de correlación entre eficiencia y densidad poblacional en Cataluña.

Asociación entre eficiencia a rendimientos variable (BCC) y Densidad poblacional		Tau_b de Kendall	Rho de Spearman
Grupo 1	Coefficiente de correlación	-0,184	-0,223
	Sig. (bilateral) - p-valor	0,169	0,178
Grupo 2	Coefficiente de correlación	0,280	0,367
	Sig. (bilateral) - p-valor	0,000	0,000

Por otro lado, se realizaron modelos de regresión Tobit entre los valores de eficiencia obtenidos en cada modelo y la densidad poblacional, y otra regresión entre la eficiencia y la cantidad de habitantes.

Las bajas densidades poblacionales de las comarcas de Conca de Barbera, Ripolles y Solsones parecen explicar una proporción de la ineficiencia ya que el método Tobit develó que en 4 de los 7 análisis en los que la DMU Conca de Barberá resultó ineficiente, dicha ineficiencia puede deberse a la baja densidad. Análogamente, para Ripolles la relación es 5/9 y para Solsones, 4/7. Dichas relaciones aumentan al analizar sólo la cantidad de habitantes, es decir, la baja cantidad de población explica una proporción de la ineficiencia en 5/7 análisis de Conca de Barberá, 6/9 en Ripolles y 6/7 en Solsonés.

### 5.3. Limitaciones de los modelos planteados

Es sabido que disminuir la cantidad de recursos existentes, para aumentar la eficiencia, no es una tarea fácil cuando esos recursos ya están instalados en el sistema. Es decir, en los modelos previamente mostrados se plantea que debe reducirse la disponibilidad de personal, la frecuencia de recolección y la capacidad total de camiones de recolección, como forma de mejorar la eficiencia, sin embargo, dichas acciones no podrían ser llevadas a cabo, sobre todo, en el corto plazo.

Reducir la disponibilidad del personal significa disminuir el tiempo de trabajo, y en consecuencia, el sueldo cobrado de las personas o en el peor de los casos, despedir del puesto de trabajo a las mismas. Está claro que eso no es el objetivo del presente estudio, sino más bien, analizar los sistemas establecidos para compararlos y proponer mejoras, evitando perjudicar a los involucrados. En tales casos, podría proponerse una reubicación del personal “sobrante”, por ejemplo, trasladándolo a un puesto trabajo dentro de las plantas de acopio y reciclaje.

El caso de disminuir la frecuencia de recolección también tiene sus limitaciones en la práctica ya que, por un lado, debería demandarse a la población que saque los residuos el mismo día que el camión los recolecta (para que no haya acumulación de los mismos, generación de olores y roedores, y evitando que los residuos se desparramen por el viento o animales); y por otro lado, muchas veces las frecuencias de recolección son definidas dentro de los contratos de trabajo con la empresa de recolección, y modificarlos no sería una actividad sencilla.

Por último, la reducción de la capacidad de camiones podría considerarse la opción más viable, con la limitación de que sería muy difícil obtener la capacidad exacta deseada debido a las capacidades preestablecidas de los camiones.



## **CAPÍTULO VI**

# **MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RECURSOS PARA LA AYUDA EN LA TOMA DE DECISIONES EN LA GTRSU**



## **6.1. Predicción en Municipios de Gestión Básica (MGB)**

En la presente sección se proponen dos heurísticas (Figura 47) para estimar la cantidad recursos necesarios para una GTRSU eficiente en el SOBA (municipios considerados de gestión básica). La diferencia entre ambas es el método de estimación que se utiliza en cada una: Regresión Lineal (RL) y Red Neuronal Artificial (RNA). Las mismas serán denominadas como M1-RL y M1-RNA respectivamente.

### **6.1.1. Descripción general**

Las heurísticas están compuestas por 3 etapas. La etapa N°1 comienza utilizando la técnica DEA para determinar las DMUs, (localidades del SOBA), eficientes. De los análisis DEA realizados en el Capítulo 5, se optó por el N°1, por brindar información de los recursos básicos necesarios para la GTRSU. Es decir, el modelo está orientado al input y se consideran como entradas la Capacidad de Recolección (C), la disponibilidad de personal (M) y Frecuencia de Recolección (F) y la salida considerada es la cantidad de RSU recolectados (O). El modelo elegido fue el CCR procurando hallar y trabajar con eficiencias de escala en la gestión.

Al observar los resultados obtenidos en el Capítulo 5, en el análisis de sensibilidad del A1-CCR del SOBA, se detecta que la presencia de la DMU Bahía Blanca influye significativamente en los resultados de eficiencia y proyecciones de las demás localidades. Por ejemplo, para que dichas DMUs puedan alcanzar la eficiencia con presencia de Bahía Blanca en el análisis, deben disminuir sus frecuencias de recolección al valor límite establecido de una vez por semana. Mientras que, al retirarla, las frecuencias de las DMUs apenas disminuyen de sus valores originales. Lo que se concluye es que, debido a las características tan distintitas de la ciudad de Bahía Blanca en comparación con las demás localidades del SOBA, en cuestión de cantidad de habitantes y superficie, es conveniente no considerarla dentro de las presentes heurísticas. De esta forma, se obtendrán valores y estimaciones más acordes a las realidades y condiciones del SOBA.

Luego de realizar el análisis DEA mencionado, en base a los resultados, las DMUs se dividen entre las eficientes y las ineficientes. Sobre las unidades ineficientes se realizan los ajustes necesarios y sugeridos por la herramienta DEA para llevarlas hacia la eficiencia. Iniciando la etapa 2, del total de DMUs eficientes se analiza en cada caso si el sistema de recolección de RSU alcanza al total de la población o si dicha localidad prevé aumentos de población y/o expansión territorial, de forma que requiera extender su sistema de

recolección y en consecuencia deba recalcular su nivel de recursos. Inclusive podría considerarse el ingreso de una nueva localidad de la cual quiera conocerse las cantidades recomendadas de C, M y F. Por su parte, las gestiones que alcancen al total de la población serán consideradas como unidades de modelado y entrenamiento de los métodos de predicción de C, M y F. En las secciones siguientes, se explicarán en detalle las etapas N°2 de cada heurística. Inmediatamente luego de la predicción, se realiza el mismo análisis DEA de la etapa 1, considerando las DMUs iniciales más las ficticias con los recursos predecidos. Aquí se analiza si la predicción fue buena o no. El parámetro decisor son los valores de eficiencia de las DMUs iniciales. Es decir, una buena predicción no debería alterar las máximas eficiencias ya alcanzadas por dichas localidades, por lo que se espera que todos los  $\theta$  sean igual a 1. En caso contrario, el ciclo finaliza y el modelo de predicción en cuestión es descartado. En caso de aceptarse dicho modelo, se observa si todas las DMUs analizadas son eficientes. En caso negativo, comienza nuevamente el ciclo, buscando ajustar los recursos de las DMUs según las indicaciones del DEA para llevarlas a la eficiencia y se repiten las etapas 1, 2 y 3. En caso afirmativo, el ciclo finaliza.

#### **6.1.1.1. Etapa 2 en M1-RL**

Con el objetivo de obtener un modelo de RL para la predicción de los recursos C, M y F para la GTRSU de las localidades, a partir de valores conocidos como la cantidad de habitantes (H), la superficie ocupada por la misma (S) y la cantidad de RSU recolectada (O), se realiza en primera instancia, el procedimiento de elección de variables por Pasos Sucesivos, descripta en el Capítulo 4. Para cada recurso, se realiza la prueba considerando como posibles variables los 3 valores conocidos mencionados. Posteriormente, se analizan los coeficientes de bondad de ajuste y se comprueban los supuestos necesarios para validar el modelo. De todos los modelos experimentados, a continuación se muestran los resultados de aquellos que superaron dichas evaluaciones (Tabla 47). Cabe destacar, que fue necesario aplicar la transformación logarítmica sobre la variable F, por no encontrarse ninguna variable que cumpla la condición de entrada para formar parte de la recta de RL.



correlaciones fuertes por ser mayores que 0,9. Por su parte los coeficientes de determinación  $R^2$ , por ser mayores a 0,9, indican que los modelos se ajustan muy bien a los datos, es decir, los modelos de RL propuestos explican más del 90% de la variabilidad de las variables utilizadas en cada caso. En la fila de F, se observa que la correlación obtenida es media y un valor de  $R^2$  que explicaría el 52% de la variabilidad de las variables.

Por último, los coeficientes A de las rectas, muestran valores de significación menores que 0,01, por lo tanto son significativos para el modelo. Para el coeficiente B, la significancia es mayor a 0,01, sin embargo, generalmente, contrastar la hipótesis “B=0” carece de utilidad, pues no contiene información sobre la relación entre las variables (Merino & Ruiz Díaz, 2005).

#### 6.1.1.1.1. Análisis de linealidad

En los siguientes gráficos de dispersión (Figuras 48 a 51) puede observarse que la distribución de la nube de puntos de todos los pares de variables estudiado, tiene una distribución con tendencia lineal.

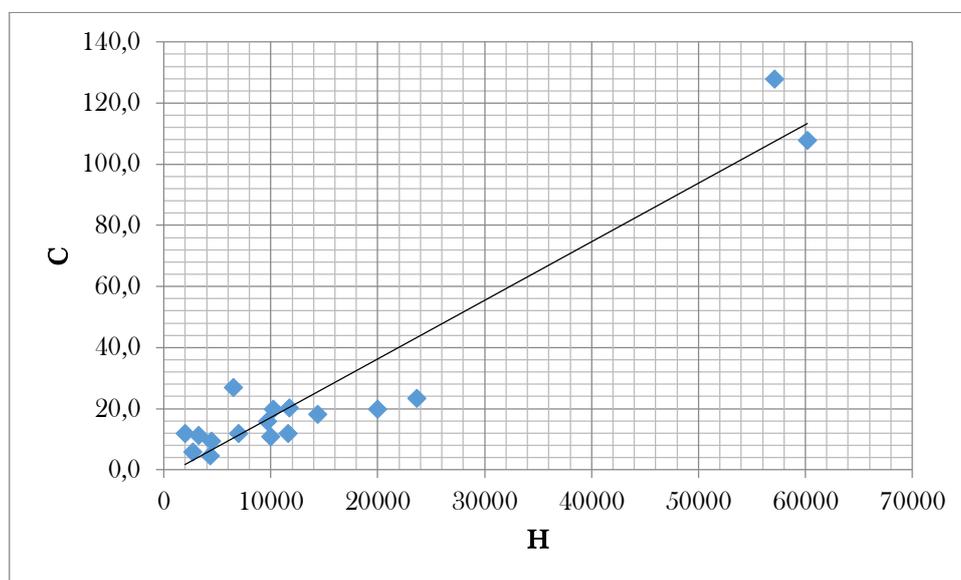


Figura 48. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación H-C.

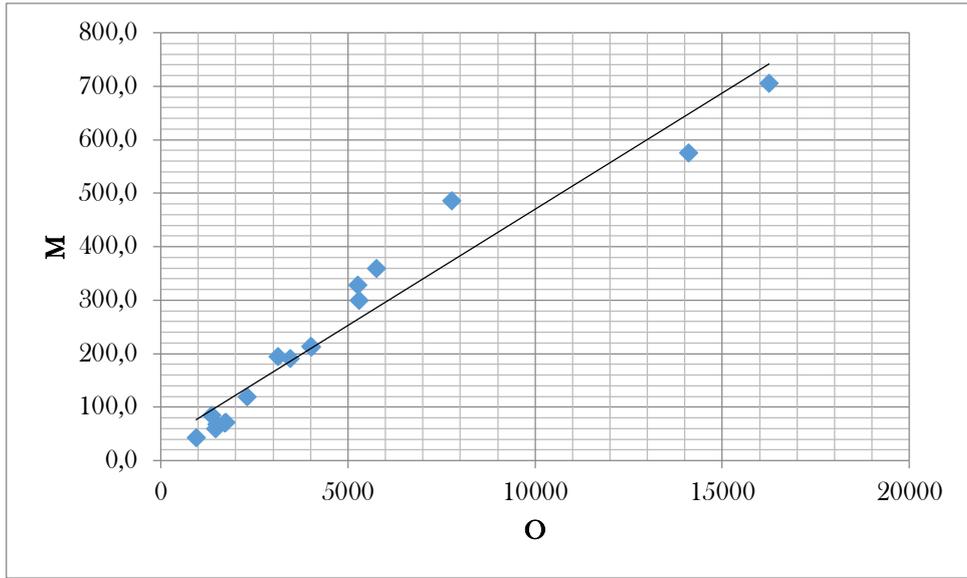


Figura 49. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación O-M

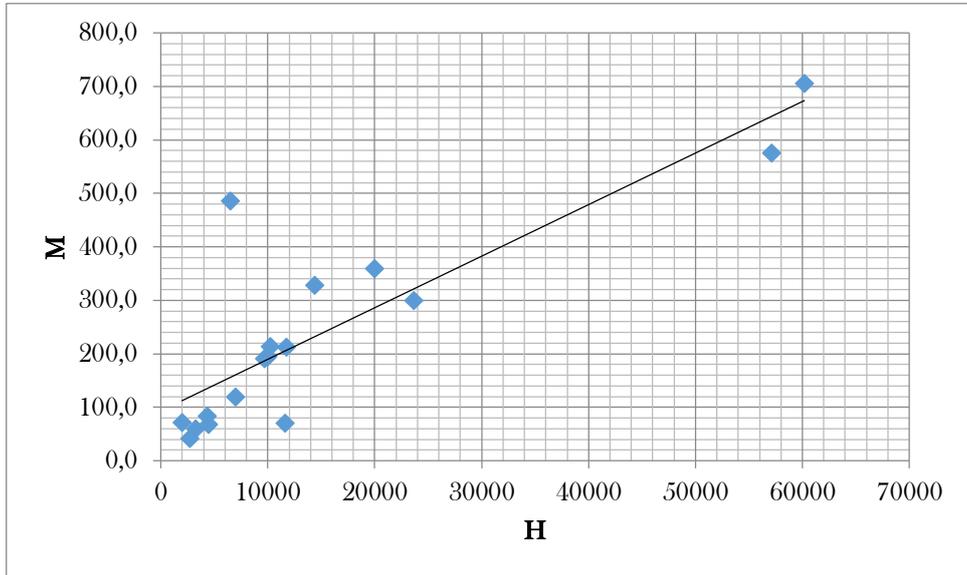


Figura 50. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación H-M.

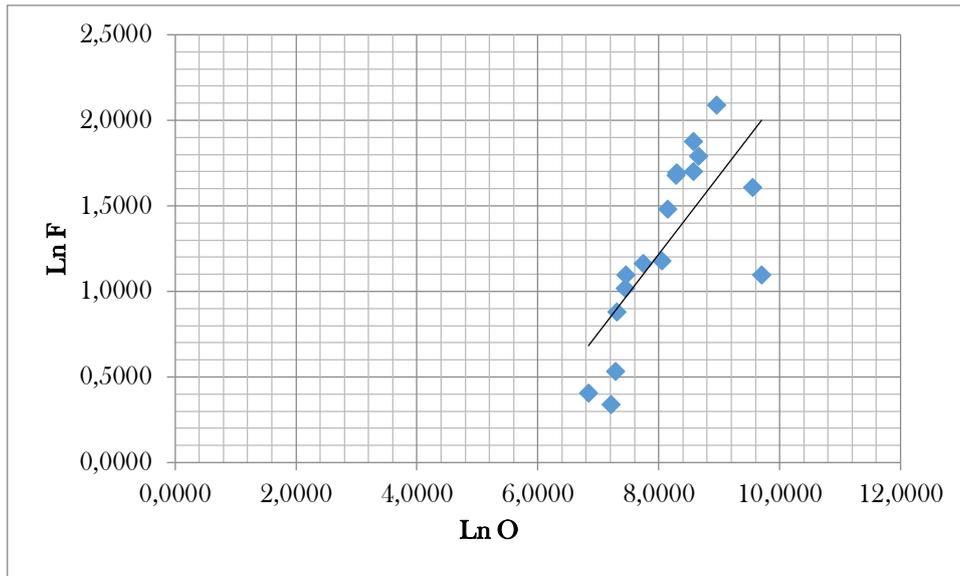


Figura 51. Gráfico de la distribución de puntos en la correlación LnO-LnF.

#### 6.1.1.1.2. Funciones resultante

En consecuencia, las funciones lineales resultantes de cada modelo de RL se muestran a continuación en las expresiones 80, 81 y 82. Posteriormente, en la Tabla 48 de la sección de resultados, se muestran los valores C, M y F de las predicciones.

$$C = 0,002H - 2,209 \quad (80)$$

$$M = 0,063O - 0,005H + 24,027 \quad (81)$$

$$F = e^{0,462\ln(O)-2,478} \quad (82)$$

#### 6.1.1.2. Etapa 2 en M1-RNA

En la presente sección, se explicará cómo se utilizó la herramienta RNA en la etapa 2 de la heurística para predecir los valores de C, M y F de las localidades del SOBA.

Como se explicó en el Capítulo 4, es necesario definir ciertos parámetros de la red en función de los resultados que se quieran obtener. En primer lugar, se definió la configuración de la red, la cual consiste en 1 capa de entrada con 2 neuronas, 1 capa intermedia con 55 neuronas y 1 capa de salida con 3 neuronas (Figura 52). El número de neuronas de la capa intermedia se determinó luego de realizar numerosas pruebas evaluando como disminuía el error medio cuadrático, además que el tiempo de procesamiento no mostraba variaciones al aumentar dicho número. El algoritmo de funcionamiento de la red utilizado fue el de Levenberg-Marquardt (Hagan & Menhaj, 1994). Como función de transferencia de la capa interna se utilizó la función Logarítmica

Sigmoidea y una función Lineal en la capa de salida. Para el desarrollo y evaluación de la RNA se utilizó MatLab®. De esta forma se obtiene un modelo de predicción que permite estimar los recursos necesarios para las DMUs que deseen aumentar el alcance del sistema de recolección de RSU. Es decir, a partir de la cantidad de H y S deseadas de alcanzar en cada DMU, se obtiene como resultado la cantidad de C, M y F necesaria para una gestión eficiente.

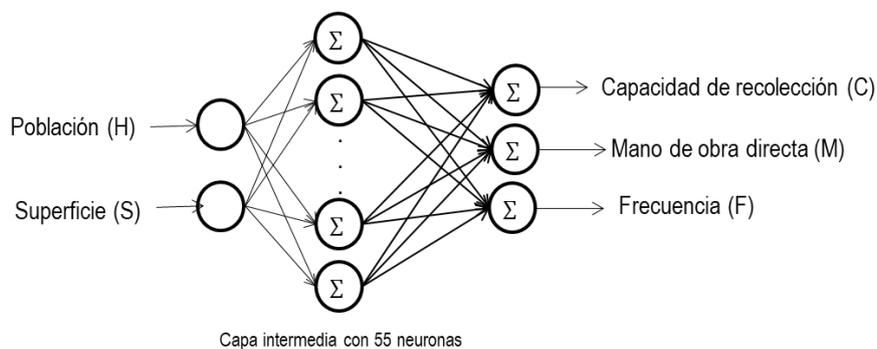


Figura 52. Configuración de la RNA en M1-RNA

Para el entrenamiento de la RNA se utilizan todas las DMUs del SOBA ya corregidas hacia la eficiencia en la etapa 1 de la heurística (17 DMUs, ya que no se considera Bahía Blanca). De dichas DMUs se seleccionan aleatoriamente el 90% para la fase de entrenamiento de la red, dejando el 10% restante para la fase de validación. Luego de numerosas pruebas en los diferentes porcentajes mencionados, se decidió no destinar ninguna DMU a una etapa de testeo por arrojar los peores resultados, debido esencialmente, a la poca cantidad de unidades en cuestión.

La red se entrenó reiteradas veces hasta notar normalización del error medio cuadrático, es decir hasta no identificar mejoras del mismo. Cada entrenamiento se detiene al superar las 1.000 iteraciones o cuando el error de validación de la red (threshold) disminuye por debajo de 0,01 (Figura 53). Los resultados obtenidos del software pueden observarse en la Figura 54 y Figura 55. En la primera se denota como disminuye el valor del MSE y en la segunda, la correlación entre los valores de outputs originales (target) y los obtenidos por la RNA entrenada (output) para cada uno de los subconjuntos. Ver que el valor R de correlación es relativamente bueno en la fase de entrenamiento, ya que está muy próximo a 1.

Los resultados de la etapa 2 utilizando RNA se muestran en la Tabla 48 de la sección de resultados.

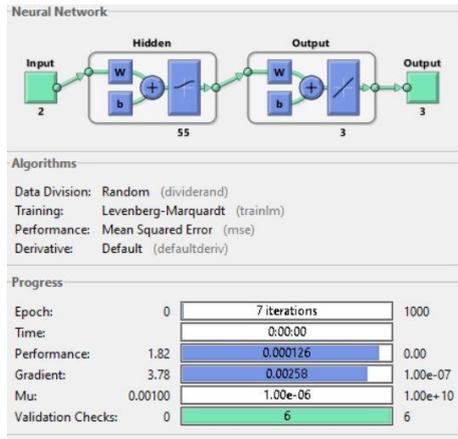


Figura 53. Características y desempeño de la RNA utilizada en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

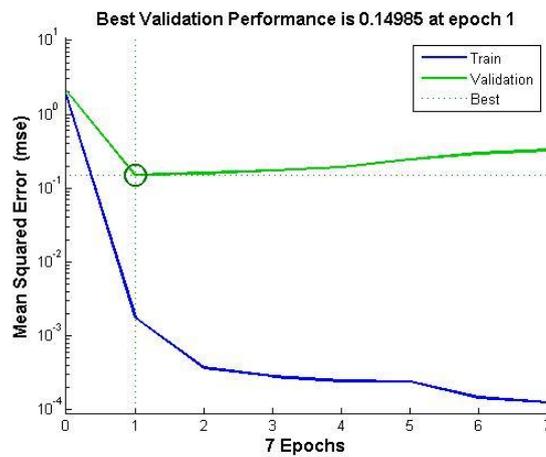


Figura 54. Desempeño del error medio cuadrático de la predicción realizada por la RNA en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

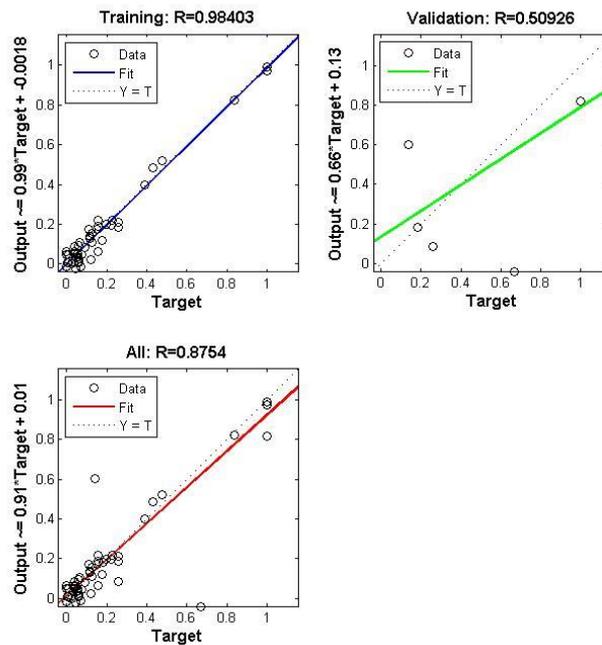


Figura 55. Correlación entre los datos originales y los predichos por la RNA en M1-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

### 6.1.2. Resultados

Siguiendo las etapas de la heurística explicadas en la descripción inicial, en la Tabla 48 se muestran los valores  $C_{ef}$ ,  $M_{ef}$  y  $F_{ef}$  que son las cantidades de los respectivos recursos  $C$ ,  $M$  y  $F$  que hacen eficientes a todas las localidades del SOBA. Posteriormente, se identificaron las DMUs 2, 3, 4, 5, 8, 9, 13 y 18, como aquellas que actualmente no alcanzan el 100% de la población en la GRSU (cabe recordar que esta información se obtuvo de las encuestas realizadas para la presente tesis y descritas en el Capítulo 3). En la parte inferior de la tabla, se observan dichas DMUs junto al supraíndice prima (<sup>'</sup>), lo cual significa que tiene los valores de  $H$ ,  $S$  y  $O$  aumentados según la necesidad de expansión necesaria en cada caso. A las mismas, se las llamará, DMUs ficticias. Sobre dichas localidades es que se buscará predecir los valores de  $C$ ,  $M$  y  $F$  necesarios para expandirse de manera eficiente. Luego de numerosas pruebas al respecto, y muchas predicciones descartadas por no cumplir la condición de eficiencia igual a 1 para las DMUs originales, en la misma tabla se muestran las predicciones seleccionadas, según el método utilizado, en las columnas RL y RNA para cada uno de los recursos. En el caso de las DMUs iniciales, las predicciones solo se muestran para comparar con los valores iniciales utilizados como entrenamiento de los modelos.

El análisis DEA CCR-I asociado a dichas predicciones se observa en la siguiente Tabla 49 en las columnas de “Efic. Etapa 2”. Sólo se muestran las DMUs ficticias, ya que las demás obtuvieron eficiencias iguales a 1. Observando el promedio de eficiencia, la predicción de la RL fue mejor que la de la RNA. En las columnas de “Proyecciones Etapa 3” se muestran las cantidades proyectadas de los recursos por el DEA de la etapa 2, según la herramienta de predicción utilizada. Por último, las columnas de “Efic. Final comparativa” muestran los resultados de eficiencia luego de realizar un DEA que considera las 17 DMUs iniciales, más las 8 DMUs proyectadas de la etapa 4 con RL, más las 8 DMUs proyectadas de RNA. Aquí, el promedio de eficiencia obtenido es igual para los dos métodos.

Tabla 48. Datos utilizados y predicciones de RL y RNA en la etapa 2 de la heurística M1

DMU	H	S	O	C			M			F		
				Cef	RL	RNA	Mef	RL	RNA	Fef	RL	RNA
2	9177	5,04	3450	16,0	16,15	14,9	191,7	195,5	172,4	4,4	3,6	5,0
3	17000	5,73	5760	20,0	31,79	23,8	360,0	301,9	387,9	6,0	4,6	4,5
4	4005	2,78	1500	9,5	5,801	12,7	68,2	98,5	100,6	2,4	2,5	2,7
5	22473	18,5	5292,5	23,5	42,74	25,9	299,9	245,1	307,8	6,5	4,4	6,5
6	11700	4,87	4015	20,3	21,19	18,2	212,9	218,5	165,8	5,4	3,9	6,2
7	10000	3,65	3120	10,8	17,79	8,9	195,0	170,6	188,1	3,3	3,5	2,6
8	3911	2,883	1348,5	4,7	5,614	12,5	84,3	89,4	114,3	1,4	2,3	2,7
9	2434	1,67	934,5	5,9	2,658	5,7	42,5	70,7	32,9	1,5	2,0	1,6
10	10210	3,88	4000	19,8	18,21	7,7	214,3	225,0	183,0	5,4	3,9	3,1
11	6499	6,31	7770	27,0	10,79	27,5	485,6	481,0	16,9	8,1	5,3	3,6
12	14383	5,76	5256	18,3	26,56	26,1	328,5	283,2	363,8	5,5	4,4	7,0
13	57152	15,5	16243	107,9	112,1	106,0	706,2	761,5	688,2	3,0	7,4	26,9
14	3217	2,06	1450	11,3	4,225	10,9	59,9	99,3	43,6	1,7	2,4	2,6
15	11600	3,09	1696,7	12,1	20,99	8,0	70,6	72,9	83,2	2,8	2,6	2,4
16	2000	1,48	1728	12,0	1,791	5,9	72,0	122,9	27,7	3,0	2,6	1,7
17	57110	13,16	14100	128,0	112	105,5	576,0	626,7	808,0	5,0	6,9	16,9
18	6650	2,3	2304	12,0	11,1	16,3	120,0	135,9	129,2	3,2	3,0	1,1
2'	9660	5,04	3622,5		17,1	22,4		203,9	170,4		3,7	7,7
3'	20000	5,73	6624,0		37,8	13,5		341,3	590,9		4,9	13,4
4'	4450	2,78	1650,0		6,7	15,6		105,7	185,6		2,6	2,8
5'	23656	18,50	5557,1		45,1	9,9		255,8	457,5		4,5	11,1
8'	4346	2,88	1483,4		6,5	15,0		95,7	207,6		2,4	2,6
9'	2704	1,67	1028,0		3,2	9,1		75,3	36,9		2,1	2,3
13	60160	15,50	17054,6		118,1	126,0		797,7	768,6		7,6	36,4
18'	7000	2,30	2419,2		11,8	21,2		141,4	166,9		3,1	1,4

Tabla 49. Eficiencias de la etapa 2 y proyecciones obtenidas de la etapa 3 de M1.

DMU	Efic. Etapa 2		Proyecciones Etapa 3						Efic. Final comparativa	
			C		M		F			
	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA
2'	1,00	0,97	17,0	21,8	202,9	165,8	3,7	5,6	1,00	1,00
3'	1,00	0,95	37,8	12,8	341,3	534,5	4,9	12,7	1,00	1,00
4'	0,94	0,52	6,3	8,1	99,5	94,2	1,9	1,4	1,00	0,98
5'	0,94	1,00	42,5	9,9	241,1	457,5	4,2	11,1	1,00	1,00
8'	0,92	0,50	6,0	7,4	87,8	84,0	1,7	1,3	1,00	0,98
9'	1,00	1,00	3,2	9,1	75,3	36,9	2,1	2,3	0,94	1,00
13'	1,00	0,93	118,1	117,3	797,7	715,7	7,6	29,4	1,00	1,00
18'	0,95	0,90	11,2	19,0	134,6	110,2	3,0	1,2	0,99	0,98
Promedio	0,97	0,85							0,99	0,99

### 6.1.3. Análisis de la variación resultante de los recursos

En esta sección se mostrará la variación resultante entre las cantidades de recursos iniciales de cada DMU y las cantidades de recursos proyectadas por la heurística. En la Tabla 50 se observa dicha variación porcentual para cada recurso y según cada modelo de predicción. En rojo se indican aquellas variaciones en donde el valor inicial del recurso es menor que el proyectado y en amarillo los incrementos menores a 10%. Es decir, en esos casos se deduce que el servicio de recolección de RSU no alcanza el 100% de la población por falta de recursos, mientras que en los casos restantes se debe a una gestión ineficiente de los mismos. Por lo tanto, se observa que la DMU 13 (Punta Alta-Villa Arias), debe la falta de alcance a la falta de los 3 recursos, mientras que la DMU 18 (Villalonga) presenta escases de C y M. En el caso de la DMU 3 (Carmen de Patagones), puede asegurarse que la disponibilidad de personal no es la suficiente, pero las cantidades de C y F varían según las predicciones por lo que debería hacerse un análisis especial.

Tabla 50. Variación porcentual resultante de los recursos.

DMU	C		M		F	
	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA
2	46,8	31,8	47,2	56,8	47,4	20,0
3	-89,0	36,2	5,2	-48,5	18,3	-111,2
4	68,5	59,7	30,9	34,6	69,0	76,2
5	41,0	86,2	73,7	50,2	23,6	-99,5
8	40,4	25,7	54,3	56,3	71,1	78,9
9	84,0	54,4	47,7	74,4	65,0	61,2
13	-7,4	-6,6	-10,8	0,6	-153,3	-879,1
18	6,4	-58,6	-12,1	8,2	26,2	69,6

## 6.2. Método para migrar de MGB a MGA

Los modelos denominados M2 utilizan los municipios de Cataluña (MGA) para predecir movimientos de recursos de los municipios del SOBA (MGB), para migrar a un sistema de recolección por contenedores. Se plantean 2 heurísticas que utilizan DEA más RL en un caso, y DEA más RNA en el otro, denominadas M2-RL y M2-RNA respectivamente.

### 6.2.1. Descripción general

Los modelos están compuestos por 3 etapas (Figura 56). La etapa 1 comienza utilizando la técnica DEA para determinar las DMUs, en este caso localidades, eficientes. De todos los análisis DEA realizados sobre los datos de Cataluña, se elige el A1 sin considerar la frecuencia, por tratarse de un valor agregado que no tiene sentido intentar predecir, ya que luego, no hay forma de desagregarlo. Por lo tanto, en el modelo DEA en cuestión, se consideran como entradas la capacidad de camiones de recolección (C), la disponibilidad

del personal ( $M$ ) y la capacidad de contenedores instalados ( $N$ ) y como salida, la cantidad de RSU recolectados en contenedores ( $O_c$ ). Se utiliza el modelo CCR por ser más exigente en la convergencia hacia la eficiencia y de esta forma, ajustar los inputs y outputs de las DMU de una manera menos variable y dispersa, lo que contribuye tanto a al modelo de regresión como al entrenamiento de la RNA. La orientación es hacia el input ya que se busca mejorar la eficiencia de la gestión disminuyendo la cantidad de inputs necesarios para recolectar los RSU recolectados. En base a los resultados, se dividen entre las DMUs eficientes y las ineficientes. Sobre las unidades ineficientes se realizan los ajustes necesarios y sugeridos por la herramienta DEA para llevarlas hacia la eficiencia.

Luego, en la etapa 2, se utilizan los valores eficientes de los recursos  $C$ ,  $M$  y  $N$  para armar modelos de predicción de los mismos, en función de la cantidad de habitantes ( $H$ ) y la superficie ( $S$ ) de una localidad. Dichos modelos se obtienen, por un lado, a partir de RL y, por otro lado, con RNA. Posteriormente se explicarán cada metodología en detalle. Los valores predecidos pasan a la etapa 3 donde son evaluadas las DMUs de Cataluña junto con las del SOBA en el mismo análisis DEA de la etapa 1. Aquí se analiza si la predicción fue buena o no. El parámetro decisor son los valores de eficiencia de las DMUs de Cataluña. Es decir, una buena predicción no debería alterar las máximas eficiencias ya alcanzadas por dichas localidades, por lo que se espera que todos los  $\theta$  sean iguales a 1. En caso contrario, el ciclo finaliza y el modelo de predicción en cuestión es descartado. En caso de aceptarse dicho modelo, se observa si todas las DMUs analizadas son eficientes. En caso negativo, comienza nuevamente el ciclo, buscando ajustar los recursos de las DMUs según las indicaciones del DEA para llevarlas a la eficiencia. En caso afirmativo, el ciclo finaliza.

#### **6.2.1.1. Etapa 2 en M2-RL**

En esta sección se desarrolla análogamente al procedimiento descrito en la etapa 2 del M1. En primer lugar, para cada recurso a predecir, se seleccionan las variables independientes ( $H$ ,  $S$  o  $O_c$ ) mediante el método de Pasos Sucesivos. Posteriormente, se analizan los coeficientes de bondad de ajuste y se comprueban los supuestos necesarios para validar el modelo. De todos los modelos experimentados, a continuación se muestran los resultados de aquellos que superaron dichas evaluaciones (Tabla 51). En este caso, fue necesario aplicar la transformación logarítmica sobre todas las variables, ya que no se obtenían buenos coeficientes de bondad de ajuste con las variables originales.

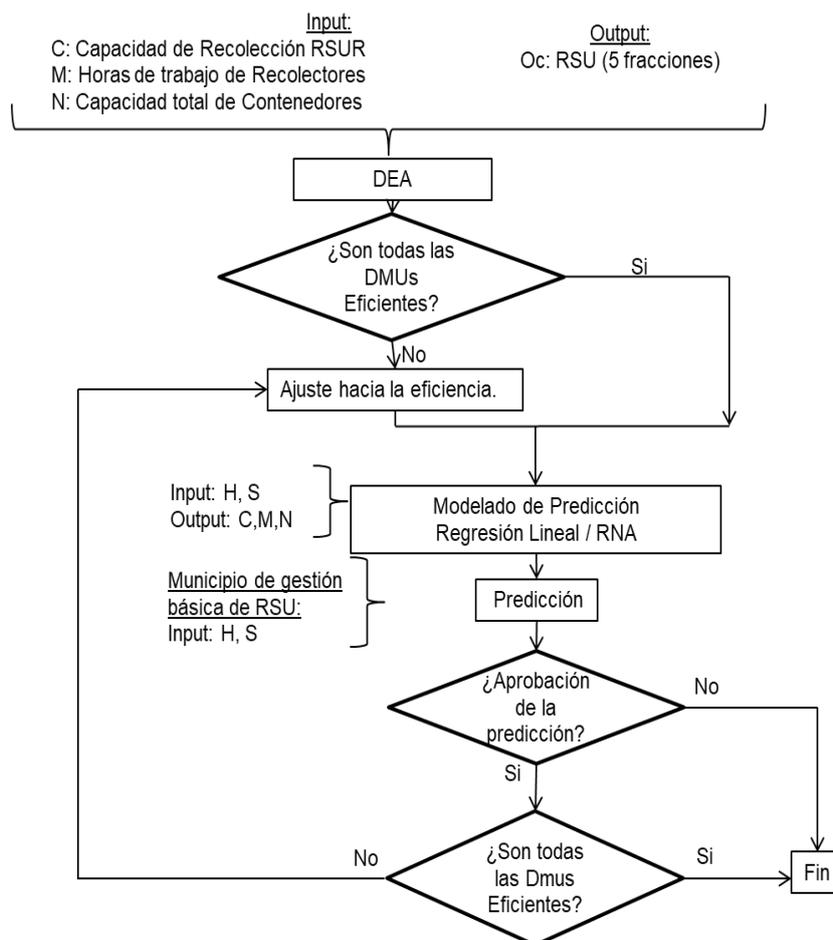


Figura 56. Heurística para predecir movimientos de recursos de los municipios del SOBA para migrar a un sistema de recolección por contenedores.

Tabla 51. Coeficientes de bondad de ajuste de la regresión lineal obtenida para M2-RL

Vble. Depend.	Vble. Independ.	R	R <sup>2</sup>	ETE	Anova <i>p valor</i>	DW	SW	Coef. a <i>(p valor)</i>	Coef. b <i>(p valor)</i>
L <sub>n</sub> C	L <sub>n</sub> H	0,969	0,939	0,249	0,000	1,500	0,180	0,983 (0,000)	-5,839 (0,000)
L <sub>n</sub> M	L <sub>n</sub> O	0,921	0,848	0,367	0,000	1,706	0,290	0,969 (0,000)	-3,534 (0,002)
L <sub>n</sub> N	L <sub>n</sub> H	0,939	0,881	0,311	0,000	1,733	0,730	0,944 (0,000)	-2,791 (0,002)
	L <sub>n</sub> S	0,967	0,934	0,238	0,000			0,119 (0,002)	

Dado que el *p valor* de la prueba Anova es menor que 0,005 para cada uno de los casos, se dice que es posible construir un modelo de regresión lineal con las variables en cuestión. Observando los valores de R se encuentran todas correlaciones fuertes por ser mayores que 0,9. Por su parte los coeficientes de determinación R<sup>2</sup>, por ser mayores a 0,8, indican que los modelos se ajustan muy bien a los datos, es decir, los modelos de RL propuestos explican más del 80% de la variabilidad de las variables utilizadas en cada caso. Por último, los coeficientes A y B de las rectas, muestran valores de significación menores que 0,01, por lo tanto son significativos para el modelo.

### 6.2.1.1.1. Análisis de linealidad

En los siguientes gráficos de dispersión (Figuras 57 a 59) puede observarse que la distribución de la nube de puntos de todos los pares de variables estudiado, tiene una distribución con tendencia lineal.

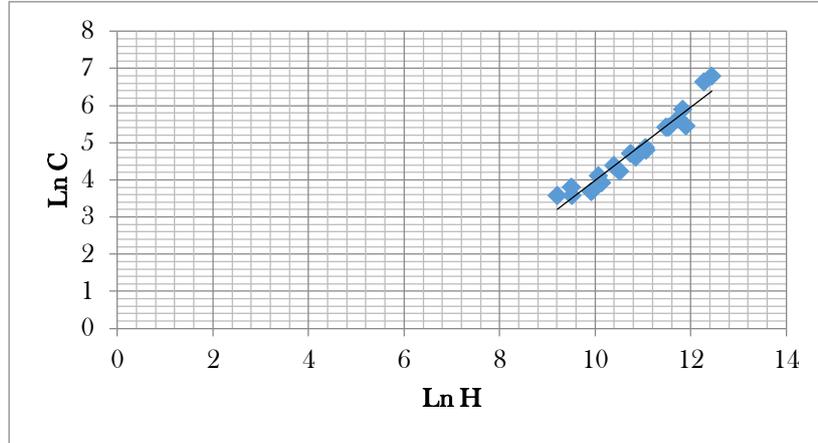


Figura 57. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación  $\text{LnH-LnC}$

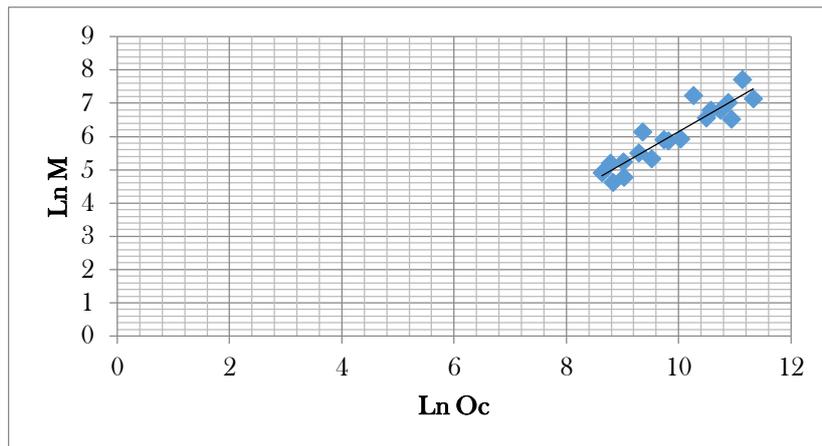


Figura 58. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación  $\text{LnOc-LnM}$

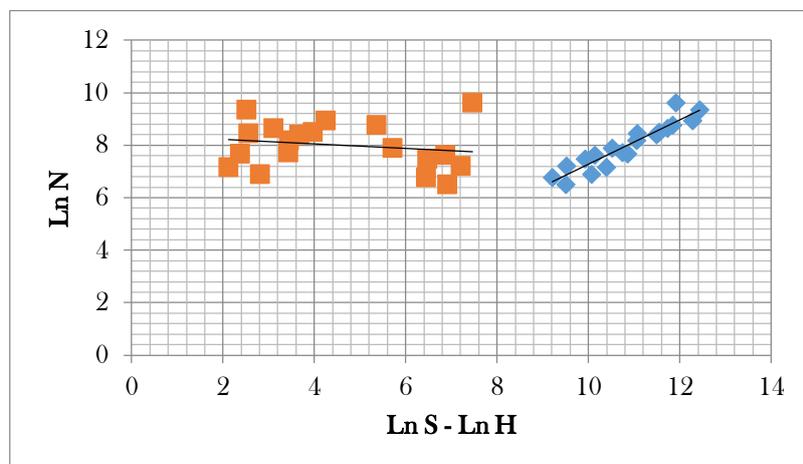


Figura 59. Gráfico de la distribución de puntos de la correlación  $\text{LnS-LnH - LnN}$

### 6.2.1.1.2. Funciones Resultantes

De esta forma, se obtienen las funciones estimadoras de los recursos C, M y N mostradas en las expresiones 83, 84 y 85. Dichos valores se muestran en la Tabla 52 de la sección de resultados.

$$C = e^{0,983 \ln(H) - 5,839} \quad (83)$$

$$M = e^{0,969 \ln(O) - 3,534} \quad (84)$$

$$N = e^{0,944 \ln(H) + 0,119 \ln(S) - 2,791} \quad (85)$$

### 6.2.1.2. Etapa 2 en M2-RNA

Iniciando la etapa 2 de la heurística DEA-RNA, se entrena la RNA con C, M y N eficientes como outputs y H y S como inputs. Es decir, dada una cantidad de población y superficie territorial de una localidad, qué capacidad de camiones de recolección, contenedores y personal se necesitan para obtener un sistema de recolección diferenciada por contenedores. De esta forma, la configuración de la red consiste en 1 capa de entrada con 2 neuronas, 1 capa intermedia con 55 neuronas y 1 capa de salida con 3 neuronas (Figura 60). El número de neuronas de la capa intermedia se determinó luego de realizar numerosas pruebas evaluando como disminuía el error medio cuadrático, además que el tiempo de procesamiento no mostraba variaciones al aumentar dicho número. El algoritmo de funcionamiento de la red utilizado fue el de Levenberg-Marquardt (Hagan & Menhaj, 1994). Como función de transferencia de la capa interna se utilizó la función Logarítmica Sigmoidea y en función Lineal en la capa de salida. Para el desarrollo y evaluación de la RNA se utilizó MatLab®.

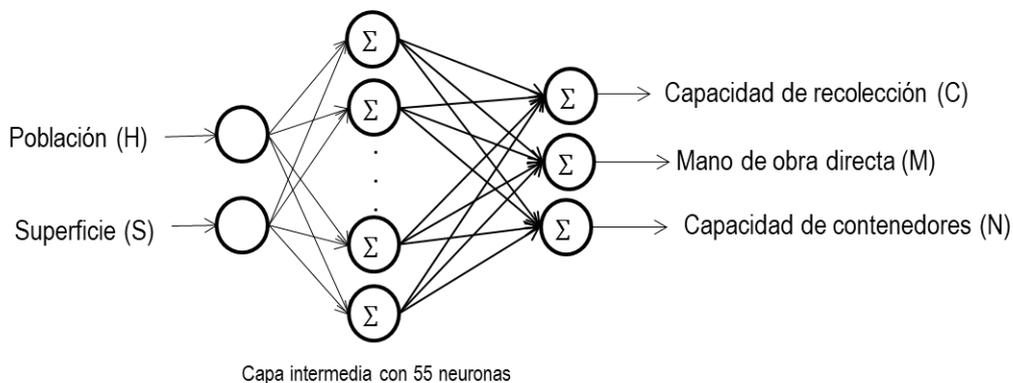


Figura 60. Configuración RNA en etapa 2 de M2.

Para el entrenamiento de la RNA se utilizan todas las DMUs de Cataluña ya corregidas hacia la eficiencia en la etapa 1 de la heurística (19 DMUs). De dichas DMUs se seleccionan aleatoriamente el 90% para la fase de entrenamiento de la red, dejando el 10% restante para la fase de validación. Luego de numerosas pruebas en los diferentes porcentajes mencionados, se decidió no destinar ninguna DMU a una etapa de testeo por arrojar los peores resultados, debido esencialmente, a la poca cantidad de unidades en cuestión. La red se entrenó reiteradas veces hasta notar normalización del error medio cuadrático, es decir hasta no identificar mejoras del mismo. Cada entrenamiento se detiene al superar las 1.000 iteraciones o cuando el error de validación de la red (threshold) disminuye por debajo de 0,01 (Figura 61). Los resultados obtenidos del software pueden observarse en la Figura 62 y Figura 63. En la primera se denota como disminuye el valor del MSE y en la segunda, la correlación entre los valores de outputs originales (target) y los obtenidos por la RNA entrenada (output) para cada uno de los subconjuntos. Ver que el valor R de correlación es relativamente bueno en la fase de entrenamiento, ya que está muy próximo a 1.

Una vez entrenada la red, se introducen valores de H y S del SOBA para predecir los C, M y N necesarios para una GTRSU eficiente. De este modo, se obtienen nuevas DMUs, las cuales, en la etapa 3, deben volver a ser analizadas para evaluar su eficiencia, retornando a utilizarse la técnica DEA y volviendo a comenzar el ciclo del modelo mencionado. Los resultados de la etapa 2 utilizando RNA se muestran en la Tabla 52 de la sección de resultados.

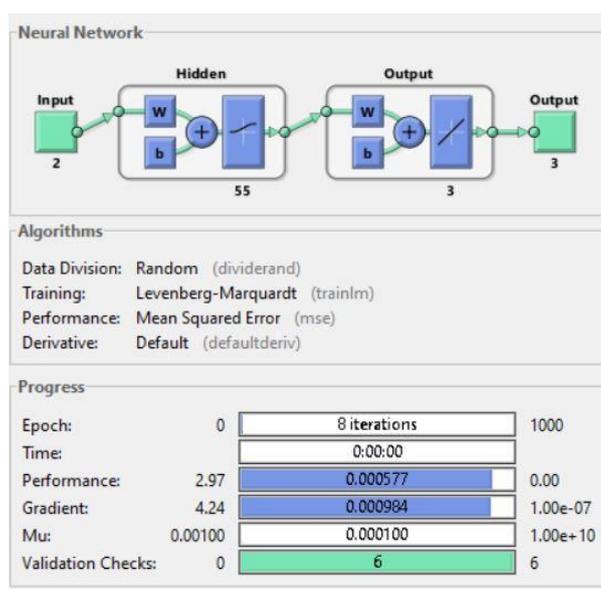


Figura 61. Características y desempeño de la RNA utilizada en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

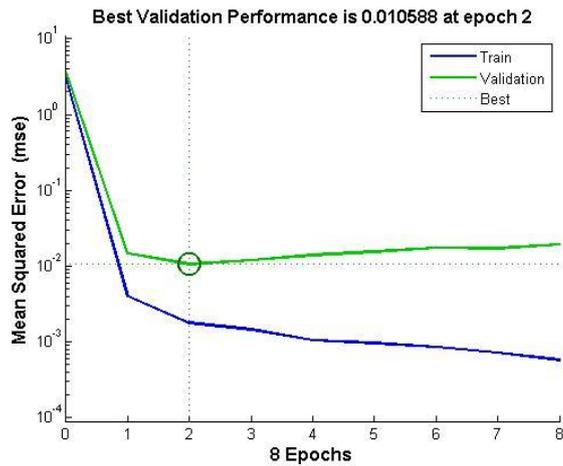


Figura 62. Desempeño del error medio cuadrático de la predicción realizada por la RNA en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

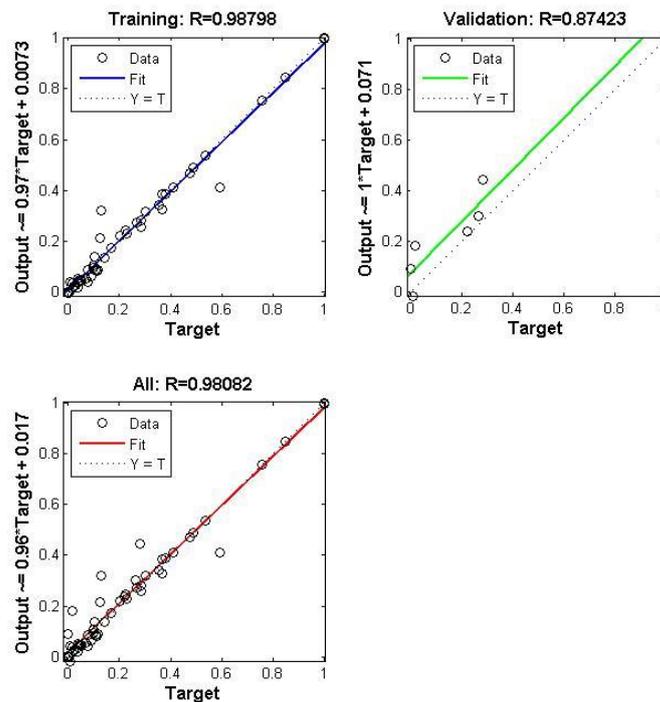


Figura 63. Correlación entre los datos originales y los predecidos por la RNA en M2-RNA. Imagen obtenida de Matlab.

### 6.2.2. Resultados

Siguiendo las etapas de la heurística explicadas en la descripción inicial, en la Tabla 52 se muestran los valores  $C_{ef}$ ,  $M_{ef}$  y  $F_{ef}$  que son las cantidades de los respectivos recursos  $C$ ,  $M$  y  $F$  que hacen eficientes a todas las localidades de Cataluña. Los mismos fueron utilizados para entrenar los modelos de RL y RNA y predecir las cantidades para las localidades del SOBA. Luego de numerosas pruebas al respecto, y muchas predicciones descartadas por no cumplir la condición de eficiencia igual a 1 para las DMUs originales,

en la misma tabla se muestran las predicciones de los 2 mejores modelos seleccionados de RL y RNA. Las predicciones para el SOBA se muestran en la parte inferior de la Tabla 52. En el caso de los municipios de Cataluña, las predicciones solo se muestran para comparar con los valores iniciales utilizados como entrenamiento de los modelos.

Tabla 52. Datos utilizados y predicciones de la etapa 2 de la heurística M2

DMU	H	S	O	C			M			N		
				Cef	RL	RNA	Mef	RL	RNA	Nef	RL	RNA
<b>Cataluña</b>												
1	148272	1738	56477	235,0	352,6	191,1	680,3	1174,3	4688,1	680,3	5345576	10197,3
2	32545	8,31	10844,5	80,5	79,4	83,8	248,0	237,3	258,1	248,0	8237,1	1312,8
3	63891	12,87	28607	123,0	154,1	130,2	1386,0	607,5	430,1	1386,0	23532,1	2498,5
4	20482	650	8255,49	40,1	50,4	42,3	118,2	182,2	125,3	118,2	325994,2	1787,4
5	46405	30,75	18209,6	112,5	112,6	111,9	355,0	392,1	348,7	355,0	39595,6	2223,4
6	97586	39,12	36033,8	227,1	233,7	224,4	714,3	759,7	711,6	714,3	100251,4	4616,4
7	252171	12,4	83290,2	900,0	594,3	900,0	1260,0	1711,0	1259,9	1260,0	83037,5	11490,9
8	138542	212,3	53344,9	364,7	329,9	365,1	1134,7	1111,1	1134,9	1134,7	688934,3	6516,3
9	124867	22,53	46363,5	284,0	297,8	284,0	897,0	969,9	897,2	897,0	75151,4	5763,4
10	51650	10,77	16967,7	101,1	125,1	121,0	373,6	366,2	414,0	373,6	16271,7	2194,5
11	23536	16,63	8217,87	61,4	57,8	60,7	188,8	181,4	183,0	188,8	11676,8	984,3
12	13609	1343	6833,85	35,8	33,7	35,7	101,4	151,7	101,1	101,4	439693,8	1345,1
13	37053	305,1	13532	68,8	90,2	74,4	209,2	294,1	221,8	209,2	279361,7	2738,5
14	63014	31,41	22868,5	130,0	152,1	149,4	378,0	489,0	408,1	378,0	53924,3	3538,5
15	103194	52,82	38882	229,0	246,9	229,6	897,0	817,8	896,2	897,0	140312,2	4997,3
16	25342	956,6	11586,9	50,8	62,1	51,2	470,1	253,0	470,9	470,1	574009,9	2078,7
17	13414	1001	5584,56	44,9	33,2	44,8	136,9	124,7	136,6	136,9	328693,3	661,1
18	215214	70,16	68781,7	768,3	508,6	768,3	2268,0	1421,4	2268	2268	367132,2	7650,06
19	9926	633,60	6513,0	36,38	24,7	41,6	181,9	144,8	194,1	181,9	160602,6	920,9
<b>SOBA</b>												
1	301572	89	140000		708,6	1598,0		2830,1	2132,3		629427,1	17314,8
2	9660	5	3450		24,1	46,1		78,2	164,7		1632,3	1475,8
3	20000	6	5760		49,2	66,7		128,5	202,4		3662,3	1113,6
4	4450	3	1500		11,2	38,2		34,9	147,8		447,8	1841,5
5	23656	19	5293		58,0	69,2		118,4	208,9		12974,6	1133,5
6	11700	5	4015		29,1	49,9		90,6	170,5		1893,6	1357,9
7	10000	4	3120		24,9	47,2		71,0	166,3		1243,6	1444,7
8	4346	3	1349		11,0	38,0		31,5	147,3		453,2	1851,2
9	2704	2	935		6,9	35,9		22,1	139,6		173,0	1986,4
10	10210	4	4000		25,4	47,5		90,3	166,8		1343,6	1433,8
11	6499	6	7770		16,3	40,4		171,8	154,4		1388,2	1704,4
12	14383	6	5256		35,6	54,9		117,6	178,3		2696,1	1241,3
13	60160	16	16243		145,3	147,1		351,0	512,8		26498,7	2936,4
14	3217	2	1450		8,2	36,6		33,8	142,2		248,4	1943,1
15	11600	3	1697		28,8	50,5		39,3	171,2		1222,5	1350,6
16	2000	1	1728		5,1	35,0		40,0	135,6		116,1	2050,3
17	57110	13	14100		138,0	142,9		306,0	509,8		21617,1	2725,1
18	7000	2	2304		17,5	42,4		52,9	157,8		574,3	1635,3

El análisis DEA CCR-I asociado a dichas predicciones se observa en la siguiente Tabla 53 en las columnas de “Efic. Etapa 2”. Sólo se muestran las DMUs del SOBA, ya que las de Cataluña obtuvieron eficiencias iguales a 1. En promedio de eficiencia, se observa que la predicción de la RL fue mejor que la de la RNA. En las columnas de “Proyecciones Etapa 3” se muestran las cantidades proyectadas de los recursos por el DEA de la etapa 2, según la herramienta de predicción utilizada. Por último, las columnas de “Efic. Final comparativa” muestra los resultados de eficiencia luego de realizar un DEA que considera las 19 DMUs de Cataluña, más las 18 DMUs proyectadas de la etapa 2 con RL, más las 18 DMUs proyectadas de RNA. Aquí, el promedio de eficiencia obtenido es igual a 1 para los dos métodos.

Tabla 53. Eficiencias de la etapa 2 y proyecciones de la etapa 3 de la heurística M2

DMU	Efic. Etapa 2		Proyecciones Etapa 3						Efic. Final comparativa	
			C		M		N			
	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA	RL	RNA
1	0,82	1,00	582,5	1598,0	1686,4	2132,3	37141,1	17314,8	1,00	1,00
2	0,60	0,40	14,4	18,5	41,6	66,0	915,3	591,8	1,00	1,00
3	0,54	0,63	24,0	41,1	69,4	127,2	1528,1	700,0	1,00	1,00
4	0,67	0,18	7,6	6,9	23,5	26,8	301,2	333,4	1,00	1,00
5	0,54	0,57	22,0	38,3	63,8	118,3	1404,1	641,8	1,00	1,00
6	0,58	0,45	16,7	22,7	48,4	77,3	1065,2	615,8	1,00	1,00
7	0,59	0,36	14,6	17,0	41,6	59,8	728,8	519,2	1,00	1,00
8	0,62	0,16	6,8	6,2	19,4	24,0	280,0	301,5	1,00	1,00
9	0,79	0,11	5,4	4,1	17,4	15,8	136,1	225,1	1,00	1,00
10	0,70	0,46	17,9	21,9	63,5	76,7	945,0	659,3	1,00	1,00
11	0,99	0,93	32,3	37,7	93,6	144,2	2061,3	1591,3	1,00	1,00
12	0,61	0,57	21,9	31,3	63,3	101,6	1394,4	707,4	1,00	1,00
13	0,56	0,69	67,6	100,8	195,7	317,9	4309,0	2012,6	1,00	1,00
14	0,95	0,18	7,8	6,4	32,2	25,0	236,7	341,3	1,00	1,00
15	0,52	0,19	7,1	9,6	20,4	32,6	450,1	257,4	1,00	1,00
16	0,98	0,21	10,0	7,3	43,0	28,4	226,4	430,2	1,00	1,00
17	0,55	0,64	58,7	91,1	169,8	285,8	3740,5	1737,8	1,00	1,00
18	0,71	0,27	12,4	11,6	37,5	43,1	407,0	446,5	1,00	1,00
Promedio	0,68	0,44							1,00	1,00

### 6.2.3. Análisis de la variación resultante de los recursos

En la siguiente Tabla 54 se muestra la variación porcentual de los recursos C y M, entre los valores actuales de las localidades del SOBA y las proyectadas por las heurísticas para migrar a un sistema de recolección por contenedores. En rojo se indican aquellas variaciones en donde el valor inicial del recurso es menor que el proyectado y en amarillo los incrementos menores al 10%. Se observa que sólo las DMUs 1, 3, 10, 11 y 18

necesitarían ampliar su capacidad de camiones. Cabe aclarar, que los camiones utilizados para la recolección por contenedores necesitan de una tecnología especial para manipularlos, por lo que la comparación no es directa, pero sirve como una aproximación a saber si es necesario invertir en más unidades. En el caso de la disponibilidad de personal, todas las localidades muestran estar sobradas y preparadas para migrar al sistema de recolección propuesto.

Tabla 54. Variaciones porcentuales de los recursos.

DMU	C		M	
	RL	RNA	RL	RNA
1	-45,6	-299,5	63,5	53,8
2	55,1	42,2	89,2	82,8
3	-19,8	-105,6	80,7	64,7
4	62,2	65,4	83,7	81,4
5	69,4	46,8	93,1	87,1
6	47,8	29,2	85,6	77,0
7	55,8	48,6	94,6	92,3
8	32,2	38,1	89,9	87,5
9	72,9	79,7	87,9	89,0
10	10,0	-9,3	70,6	64,5
11	-7,8	-25,8	93,2	89,6
12	51,4	30,5	93,2	89,1
13	38,6	8,3	72,8	55,8
14	54,2	62,2	64,2	72,2
15	91,4	88,3	95,7	93,2
16	16,8	38,9	40,3	60,5
17	54,2	28,8	70,5	50,4
18	-3,5	3,5	68,8	64,1

### 6.3. Limitaciones de los modelos planteados

Cuando se decidió utilizar RNA y RL como herramientas de predicción se tuvo en cuenta que la escasa cantidad de unidades de análisis no era la adecuada según la bibliografía consultada. El intento por aumentar dicha cantidad persistió, pero al depender de la respuesta de personas externas al estudio, los tiempos de recolección de datos se extendieron más allá de lo esperado y en determinado momento hubo que decidir trabajar con los datos existentes. Si bien, luego de reiteradas pruebas, los resultados obtenidos fueron más que satisfactorios, cabe resaltar que las predicciones realizadas son fuertemente dependientes de los datos utilizados y por ende, incorporar nuevas unidades de análisis podría variar completamente los resultados finales.

Igualmente, los análisis realizados cumplen con los objetivos de la presente tesis doctoral, al estudiar los distintos sistemas de GIRSU establecidos en dos regiones del mundo, compararlos, evaluar sus eficiencias y proponer un modelo heurístico de predicción utilizando las herramientas estudiadas.



## **CAPÍTULO VII**

# **CONCLUSIONES**



## 7.1. Descripción de los sistemas de GRSU

No es casualidad que la UE alcance los mayores niveles de reciclaje, reutilización y concientización social del mundo. La generación de políticas ambientales y el establecimiento de metas y plazos fue el motor, en ese territorio, para que la evolución de la GRSU se genere y se migre del sistema lineal de generación de RSU a uno circular. A partir de las entrevistas realizadas con encargados de la GRSU en ayuntamientos y comarcas de Cataluña, se pudo observar como la obligación por cumplir las metas está presente en las decisiones tanto estratégicas como del día a día. Sin embargo, tras acumular casi 30 años de experiencia, la UE reconoce que las políticas tradicionales basadas en la emisión de normativas y su control, disponer de la infraestructura idónea (contenedores, medios de transporte, plantas de separación, rellenos sanitarios, etc.), así como el desarrollo continuo de campañas de sensibilización ciudadana a favor de la separación en origen y del consumo de productos reciclados, son precondiciones esenciales y necesarias, pero no suficientes. Es decir, en los últimos años, se ha detectado que los sistemas se han estancado y ya no son suficientes para alcanzar las metas crecientes establecidas. Según las opiniones escuchadas de dichas entrevistas, es necesario complementar esa educación con políticas de incentivos y desincentivos económicos que animen a los actores sociales a actuar en la dirección adecuada.

En particular, España no se encuentra situada dentro del ranking de los primeros países europeos en cuestión de recuperación de residuos, pero se detectó que la tasa que pagan los ciudadanos por la recolección y gestión de los residuos es muy reducida en relación con la mayoría de dichos países, ya que apenas supone un tercio de lo que se paga en países como Alemania, Dinamarca y Países Bajos, por lo que el sistema de tasación vigente no contribuye a paliar el déficit generado en la prestación del servicio municipal de GRSU. Para ello se han creado los Sistemas Integrales de Gestión (SIG) cuyo objetivo es financiar el coste del sistema de recolección, transporte y tratamiento de los residuos, y compensar a las entidades locales que participen en ellos, mediante fondos obtenidos de las empresas adheridas al SIG. Cataluña ha sabido implementar muy bien dichos sistemas y es quien registra los mejores valores de reciclaje en España, y hasta se encuentra al nivel de las primeras ciudades europeas.

Hasta 1991 el problema de los RSU y residuos industriales era un tema no resuelto en la región de América Latina y el Caribe y, en general, mal abordado. A partir de la Agenda 21 realizada en 1992 muchos países latinoamericanos, con miras a cumplir con las metas

propuestas en dicho programa, modificaron su legislación ambiental para, seguidamente, diseñar planes de GRSU, tanto a nivel nacional como municipal adaptados a las necesidades de cada región o zona. Sin embargo, desde entonces ha prevalecido el manejo de los residuos bajo el esquema de “recolección y disposición final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos, así como la disposición final sanitaria y ambientalmente adecuada. A su vez, la generación de RSU per cápita ha registrado severos aumentos en los últimos años, pero la infraestructura para su gestión, aprovechamiento y disposición final adecuada no van de la mano con dicho crecimiento.

Desde la promulgación de dicha Ley Nacional N° 25916, en Argentina se dio comienzo a distintas iniciativas provinciales y municipales para cumplir con los objetivos propuestos. Cada ciudad comenzó por realizar las mejoras necesarias según el estado en el que se encontraba su respectivo sistema de GRSU. De esta forma, los cambios y avances en algunos municipios fueron notables, mientras que en otros se mantiene la falta de un tratamiento integral de los RSU e incluso, la utilización de basurales a cielo abierto como método de disposición final, son una de las principales consecuencias de una gestión inadecuada, ineficiente e insuficiente de los RSU. Las dificultades para implementar las normativas se deben principalmente a la falta de continuidad de las gestiones, ocasionada por los cambios en las administraciones municipales, impidiendo la profesionalización y sustentabilidad del sector. Sumado a esto la deficiencia presupuestaria de los organismos competentes de la GRSU hacen que los esfuerzos realizados sean descoordinados e ineficientes. En el SOBA, si bien se encuentra bien posicionado en comparación con otras regiones del país, los avances desde la sanción de la ley no han sido los esperados y solo el municipio de Tres Arroyos procesa el 100% de los RSU que genera.

Con el fin de recolectar información acerca de la gestión de RSU en SOBA y Cataluña se realizó un formulario para encuestar a las personas encargadas de la GRSU. Se consiguieron 19 respuestas de Cataluña y 18 del SOBA. Con dichos datos, en primer lugar, se evidenciaron las grandes diferencias existentes entre las regiones y en segundo lugar, se utilizaron para los posteriores análisis realizados.

El tipo de recolección de RSU utilizado en todos los distritos encuestados del SOBA es el denominado “Puerta a Puerta”, donde manualmente son recolectadas las bolsas de residuos depositados por los vecinos en los cestos de cada domicilio, y depositadas en un

camión que circula a la par de la persona que junta la bolsa. La frecuencia de recolección registrada en promedio es entre 5 y 6 veces por semanas. El método de disposición final más común es el vertedero semicontrolado, ya que solo existen 3 rellenos sanitarios en la región, así como también se encuentran basurales sin control. Por otro lado, de los 18 municipios encuestados, 13 afirman desarrollar algún programa de recuperación de residuos reciclables de papel/cartón, plásticos, metales y vidrio. De estos, 6 casos realizan recolección diferenciada por días, y los restantes 5 casos, poseen centros de disposición de RSUR, llamados “Puntos Limpios” o “Ecopuntos”. Dichos materiales, son destinados en su mayoría a plantas de acopio existentes en la región y luego vendidos a empresas de reciclaje fuera del SOBA.

Respecto a Cataluña, la logística de recolección de RSU consiste en una recolección por contenedores diferenciados en vidrio, papel, envases ligeros y fracción orgánica. La frecuencia varía según la fracción, coincidiendo en 6/7 veces por semana para lo no reciclable. Cataluña incorpora instrumentos fiscales, para cobrar a los municipios en proporción a la cantidad de RSU depositada en el relleno sanitario. Luego, los fondos recaudados, retornan a las administraciones locales para premiar aquellas gestiones de residuos que impulsen una buena recolección selectiva, es decir, se incentiva la recolección diferenciada y se penaliza los residuos destinados a vertedero o a incineradora. Asimismo, la recaudación obtenida es destinada a un Fondo de Gestión de Residuos, que se utiliza para investigar sistemas de tratamiento alternativos, financiar el tratamiento de la fracción orgánica recolectada selectivamente y realizar campañas de sensibilización ambiental. Por otro lado, más de 800 empresas están ligadas al ámbito de los RSU, las cuales dan servicio a más de 20.000 empresas productivas, y aportando el 6% del valor bruto catalán anual.

En cuanto a las metodologías utilizadas en la planificación logística de la recolección de RSU, ambas regiones poseen rutas y frecuencias de recolección fijas en su mayoría determinadas por la experiencia. En Cataluña la ubicación de los contenedores en su mayoría fue realizada a partir de cálculos aproximados en función de la superficie y la cantidad de población por sector. Por otro lado, en Cataluña todos los encuestados realizan campañas de concientización social respecto a la correcta separación de los RSU y a la disminución de la generación de los mismos, mientras que en SOBA la mayoría de los municipios no realiza dichas campañas.

En esta sección se pudo generar el marco de referencia para el diseño de las herramientas de ayuda a la toma de decisión desarrolladas en las secciones subsiguientes.

## 7.2. Análisis de eficiencia de la GTRSU

Los resultados arrojados por los análisis DEA en el SOBA, sitúan a Bahía Blanca como la única ciudad que registró eficiencia máxima en todos los análisis. Seguidamente, Carmen de Patagones, Garré-Bonifacio-Arroyo Venado, Stroeder y Villalonga obtuvieron  $\theta=1$  en todos los análisis BCC, y Casbas y Cnel. Pringles  $\theta=1$  en 3 de los 4 análisis que incluyen a todas las DMUs. Por el contrario, las localidades que no obtuvieron nunca la máxima eficiencia son Carhué, Cnel. Dorrego, Darregueira, Guaminí, Pigüé y Punta Alta-Villa Arias. Observando el análisis que sólo consideró a los municipios que con sistema de recuperación de materiales reciclables (A5), Cnel. Dorrego es quién obtuvo  $\theta=1$  en el modelo CCR, acompañado por Casbas en el modelo BCC. Todos los análisis demostraron el comportamiento de rendimientos creciente en las localidades ineficientes. Este resultado apoya la idea de que la GIRSU de los municipios del SOBA son gestiones bastante nuevas que están creciendo de a poco, con muchas cosas por hacer y mejorar, pero con presupuestos ajustados que limitan su accionar. El análisis de sensibilidad develó variaciones significativas sólo al retirar un municipio y en algunos análisis, resultando modelos robustos ante las observaciones *outlier*. Respecto al estudio de *Benchmark*, como es de esperar Bahía Blanca registra la mayor cantidad de referencias, sin embargo, Stroeder registra una mayor intensidad en las referencias adjudicadas. Esto se debe a que se comporta como el principal referente de las localidades de escala similares, mientras que Bahía Blanca es única en su tamaño. El análisis de correlación entre densidad de población y eficiencia obtenida, indica no haber relación. Mediante el análisis de regresión *Tobit* entre los valores de eficiencia obtenidos en cada modelo y la densidad poblacional y entre la cantidad de habitantes, se pudo explicar algunos de los bajos valores de eficiencias obtenidos, como el caso de Monte Hermoso.

En Cataluña, Terrasa ha sido el único municipio que ha resultado eficiente de escala constante en todos los análisis. Asimismo, Conca de Barberá, Plat d'Urgell y Solsonés dieron valores de  $\theta=1$  en todos los análisis variando entre rendimientos constantes y variables, mientras que Baix Ebre, Barberá del Vallés, Olesa y Pallar Jusá presentan una situación parecida a la descrita para las localidades mencionadas previamente, exceptuando un valor de eficiencia distinto de uno en alguno de los análisis. Por el contrario, los peores desempeños se encuentran en Hospitalet de Llobregat, Lleida, Reus

y Mataró. En la gran mayoría de los análisis de cada localidad se obtienen rendimientos de escala crecientes. Hospitalet de Llobregat registra rendimientos decrecientes en 6 de los 8 análisis realizados. Al igual que en el estudio en SOBA, el análisis de sensibilidad develó que los resultados son robustos ante las observaciones *outlier*. El estudio de *benchmark* muestra que Girona y Terrassa son los municipios que más veces sirven de referencia a las demás localidades y se adicionan Pla d'Urgell y Solsones en los modelos BCC. Por otro lado, en el análisis de correlación entre eficiencia y densidad poblacional, se registró un valor significativo indicando que las localidades de mayores densidades arrojaron peores valores de eficiencia. Por su parte, la regresión Tobit detectó que las bajas densidades poblacionales de las comarcas de Conca de Barbera, Ripolles y Solsones parecen explicar una proporción de la ineficiencia obtenida en la mayoría de los análisis DEA.

### 7.3. Métodos de predicción de GTRSU eficientes

Las heurísticas de predicción planteadas en el Capítulo VI mostraron resultados coherentes que supieron cumplir las condiciones establecidas. En la segunda etapa de ambas, el método de regresión lineal predijo mejores valores que la red neuronal artificial, pero igualmente, al efectuar la tercera etapa, los valores se corrigieron adecuadamente, resultando máximas eficiencias para todas las predicciones con ambos métodos. Respecto a las variaciones resultantes de los recursos, según la primera heurística, se detectó que Punta Alta-Villa Arias, debe la falta de alcance del servicio de recolección de RSU a la falta de recursos C, M y F, mientras que Villalonga presenta escasos solo en C y M. El resto de las localidades que no alcanzan el 100% de la población no lo hacen por una gestión ineficiente de los recursos.

Analizando la segunda heurística, la variación resultante de los recursos indica que las localidades de Bahía Blanca, Carmen de Patagones, Laprida, Monte Hermoso y Villalonga, necesitarían ampliar su capacidad actual de camiones para migrar a un sistema por contenedores (además de adaptarlos con la tecnología necesaria). En el caso de la disponibilidad de personal, todas las localidades muestran estar sobradas y preparadas para migrar al sistema de recolección propuesto.

Los modelos aquí planteados forman parte del cumplimiento del objetivo general de la presente tesis doctoral, de desarrollar instrumentos que ayuden a los gestores de RSU en la toma de decisiones eficientes y sustentables con la sociedad y el medio ambiente, al

plantear una herramienta que analice los recursos existentes en la GTRSU y proponga movimientos que maximicen la productividad y la eficiencia de la gestión, y, por otro lado, proponga lineamientos (al menos iniciales) para evolucionar los sistemas de gestión básica de RSU a gestiones que valoricen los mismos.

#### **7.4. Trabajos futuros**

Un factor que se analizó en primera instancia, pero luego no se consideró por cuestiones de extensión del trabajo y porque resultaba un tanto complejo la recolección de datos, fue incorporar los factores o variables externas en los análisis DEA, como por ejemplo, forma del área de recolección, influencia de la recolección informal de RSU, gestión pública o privada, entre otros. Como trabajo futuro podrían definirse dichas variables y repetirse los análisis DEA considerándolas, de modo de lograr valores de eficiencia más reales y justos.

Respecto al segundo modelo de predicción, se espera poder repetir dichos análisis con mucha más cantidad de unidades de entrenamiento. Se sabe que todos los datos necesarios son recolectados por toda el área metropolitana de Barcelona (que incluye a más de 40 municipios) pero no pudieron ser utilizados en este estudio por no poder acceder a ellos a tiempo. Asimismo, se obtendrían datos con mayor variabilidad en cuestión de cantidad de población y densidad, lo que contribuiría a predecir resultados acordes para un mayor rango de localidades.

Por otro lado, con las encuestas ya definidas, así como las metodologías de procesamiento y análisis de datos, los modelos DEAs podrían aplicarse en otras regiones del país y del mundo de interés.

#### **7.5. Reflexiones finales**

Es claro que las decisiones en torno a la GRSU en los municipios del SOBA se toman considerando esencialmente las posibilidades presupuestarias del corto plazo, las cuales, al no tener un respaldo y apoyo del gobierno provincial y nacional, terminan resultando muy acotadas, impidiendo que pueda salirse del “generar-recolectar-tirar”. Asimismo, la complejidad del problema aumenta cuando los responsables de la GRSU varían año a año. En los municipios encuestados, pudo verse que aquellas personas que se encontraban a cargo hace varios años, tenían una visión de la situación mucho más amplia así como más actividades desarrolladas o por desarrollar en pos de una

recolección diferenciadora de RSU. Ante dicho panorama, realizar estudios de diagnóstico de la situación actual y generar herramientas para recolectar y analizar datos que ayuden a maximizar la productividad de los recursos y la eficiencia de las gestiones, es clave para encontrar soluciones viables en torno a una gestión de RSU sustentable.

En Cataluña, si bien presenta una GIRSU eficaz en términos de recuperación de materiales, los últimos años muestran un estancamiento en cuanto al aumento de dicha recuperación. Según palabras de los gestores catalanes, se prevé un cambio logístico para mejorar los porcentajes de recuperación y cumplir con los objetivos de la UE.

Sin embargo, el cambio real no sólo dependerá de las políticas gubernamentales implementadas, sino que es necesario un cambio cultural en la forma de pensar a la basura. De todas las formas de contaminación que provoca la sociedad, creo que la generación de RSU y su no tratamiento es la que provoca daños más directos y visibles en el medio, y por lo tanto, sobre la que, como ciudadanos, más posibilidades de acción tenemos. Y aquí no me refiero solamente al SOBA o a los municipios de que no aplican un plan de GIRSU. Cataluña y aquellas ciudades que implementan un sistema de recolección diferenciada de RSU también deberían realizar un cambio cultural en pos de una convivencia más saludable con el medio ambiente. Observando la historia del mundo, veo que en algún momento la civilización comenzó a elegir comprar “comodidad” y elegir la satisfacción del aquí y ahora sin importar o hacer caso a lo que pasó antes o pasará después. En algún momento se dejaron de valorar las cosas que se producían y adquirían y se comenzó a pensar todo como descartable, y hasta se produjo un cambio de paradigma al considerar que el desapego de las cosas “es sano”. Considero que ese “algún momento” sucedió porque la civilización era ignorante y rápidamente compró lo que, a algunos pocos, les convenía vender. Hoy en día tenemos las herramientas a disposición para no ser ignorantes. Consumir desmedidamente, comprar simplemente por tener lo último de moda, usar y desechar a la primera falla es, en el mejor de los casos, de ignorante. Y lo peor de todo es que es una ignorancia contagiosa.

Considero que somos un país joven, que progresivamente de a poco va creciendo y aprendiendo no solo en cuestión de gestión de RSU sino también en como funcionar mejor como sociedad. Y con “somos un país” me refiero a cada ciudadano y ciudadana, haciendo hincapié en que los cambios dependen de nosotros, de nuestros cambios de

actitud y hábitos en pos de ser más conscientes y solidarios, evitando hacer “la fácil”, a costa de perjudicar a otros y al entorno.

## BIBLIOGRAFÍA

About Najm, M. & El-Fadel, M., 2004. Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model. *Environmental Modeling and Software*, p. 19: 1151-1164.

About Najm, M. y otros, 2002. An optimization model for regional integrated solid waste management. *Waste Management and Research*, pp. 20: 37-45.

Agència de Residus de Catalunya, 2014. *Metodologia d'obtenció de les dades estadístiques de residus municipals a Catalunya*, Barcelona: Generalitat de Catalunya.

Agencias de La Nueva, 2017. Una correcta gestión de residuos, la deuda ambiental en el sudoeste. *La Nueva*, 27 Agosto, pp. Levantado de: <http://www.lanueva.com/nota/2017-8-27-7-42-0-una-correcta-gestion-de-residuos-la-deuda-ambiental-en-el-sudoeste>.

AIDIS, 2005. *Directrices para la gestión integrada y sostenible de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe*, Sao Pablo, Brasil: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS.

Ali, M., Yadav, A., Anis, M. & Sharma, P., 2015. Multiple criteria decision analysis using DEA-TOPSIS method for hazardous waste management: a case study of the USA. *International Journal of Managing Information Technology (IJMIT)*, pp. Vol.7, No.3. 1-17.

Al-Khatib, I., Arafat, H. A., Basheer, T., Shawahneh, H., Salahat, A., 2007. Trends and problems of solid waste management in developing countries: A case study in seven Palestinian districts. *Waste management*, pp. Vol: 27, Issue: 12, Page: 1910-9.

Alvarez, L., Aymemi, A., Codina, E., Coll, E., Colomer, J., Gijón, R., Llopart, S., Martín, P., Puig, I., Salvans, C., 2010. *Manual de recogida selectiva puerta a puerta*, Barcelona: Associació de Municipis Catalans per a la recollida selectiva porta a porta.

Amato, F., López, A., Peña-Méndez, E. M., Vañhara, P., Hampl, A., Havel, J., 2013. Artificial neural networks in medical diagnosis. *J Appl Biomed*, pp. 11, 47-58.

Andolino, V. 2014. [En línea] Available at: <https://www.scribd.com/document/208054916/10-Lineamientos-minimos-para-la-Preparacion-de-un-Plan-Municipal-GIRSU-03>. Consultado el 5/5/2017.

Arendse, I. & Godfrey, L., 2010. Waste management indicators for national state of environmental reporting. *United Nations Environment Programme (UNEP), Publications*.

Artaraz Miñón, M., Forcada Sainz, J. & García Alonso, O., 2012. La gestión de los residuos municipales en España: ¿vamos por el buen camino?. *Revista española de control externo*, pp. 14(40), 79-104.

Asociación Observatorio de la Sostenibilidad, 2016. *Sostenibilidad en España 2016. Cumplimiento de los objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas*, Madrid. España: s.n.

Athanassopoulos, A. D. & Curram, S. P., 1996. A comparison of data envelopment analysis and artificial neural networks as tools for assessing the efficiency of decision making units. *Journal of the Operational Research Society*, pp. 47(8), 1000-1016.

Azadi, S. & Karimi-Jashni, A., 2016. Verifying the performance of artificial neural network and multiple linear regression in predicting the mean seasonal municipal solid waste generation rate: A case study of Fars province, Iran. *Waste Management*, pp. 48, 14-23.

Baba, S. J. O., Purwanto, D. E. A. & Sunoko, H. R., 2015. Evaluation of Municipal Solid Waste Management System (Case Study: Graha Padma Estate, Semarang). *Science Journal of Environmental Engineering Research*, p. 2015.

Báez Alcántara, N. M., 2016. *Comparación de la gestión de residuos entre varias ciudades europeas (Barcelona, París, Hamburgo y Praga) y propuesta de mejora en la logística de recolección*, Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona: Trabajo Final de Master.

Batinic, B., Vukmirovic, S., Vujic, G., Stanisavljevic, N., Ubavin, D., Vumirovic, G., 2011. Using ANN model to determine future waste characteristics in order to achieve specific waste management targets-case study of Serbia. *Journal of Scientific and Industrial Research*, pp. 70, 513-518.

Baud, I., Grafakos, S., Hordijk, M. & Post, J., 2001. Quality of Life and Alliances in Solid Waste Management. *Cities*, pp. Vol: 18, Issue: 1, Page: 3-12.

Benítez, S. O., Lozano-Olvera, G., Morelos, R. A. & de Vega, C. A., 2008. Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Management*, pp. 28, 7-13.

BiPRO and the Copenhagen Resource Institute (CRI) in cooperation with ENVIRON, ENVIROPLAN, Geotest and ACR+, 2015. *Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU*, Bruselas: s.n.

Buenrostro, O., Bocco, G. & Vence, J., 2001. Forecasting generation of urban solid waste in developing countries: a case study in Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, pp. 51(1), 86-93.

Cano, E., 2011. Catalunya ha avanzado mucho en el ámbito de la recuperación de los residuos. *Especial Cataluña*, 3 junio, pp. 16-18.

Carson, R., 1962. *Silent Spring*. Boston. EEUU: Houghton Mifflin Harcourt.

Castro Bonaño, J. M., 2002. *Indicadores de Desarrollo Sostenible Urbano: Una Aplicación para Andalucía*. Tesis Doctoral: Universidad de Málaga.

Cavallin, A., Rossit, D., Frutos, M. & Vigier, H., 2016. *Eficiencia en la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis y evaluación*. Salta, s.n.

CEAMSE, 2009. *Estudio de calidad de los residuos sólidos de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*, Buenos Aires. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires: s.n.

Çelebi, D. & Bayraktar, D., 2008. An integrated neural network and data envelopment analysis for supplier evaluation under incomplete information. *Expert Systems with Applications*, pp. 35(4), 1698-1710.

CEMPRE, 2010. *Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado*. São Paulo: CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem.

CEPAL, 2018. *Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile: s.n.

Cifrian, E., Coz, A., Viguri, J. & Andrés, A., 2010. Indicators for valorisation of municipal solid waste and special waste. *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1(4), 479-486.

Comrie, A. C., 1997. Comparing neural networks and regression models for ozone forecasting. *Journal of the Air & Waste Management Association*, pp. 47(6), 653-663.

Congreso de la Nación de la República Argentina, 2004. *Ley N°24916, Residuos Sólidos Urbanos*, Buenos Aires. Argentina: s.n.

Consejo de la Unión Europea, 1999. *Eur-Lex*. [En línea] Available at:  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:OJ.L .1999.182.01.0001.01.SPA&toc=OJ:L:1999:182:TOC>

Crowell Barbalace, R., 2018. *The History of Waste. Do you want to be a garbologist?.* [En línea] Available at:  
<https://environmentalchemistry.com/yogi/environmental/wastehistory.html>

Desmond, M., 2006. Municipal solid waste management in Ireland: assessing for sustainability. Volumen 39(1): 22-23.

Diputació Barcelona, 2016. *13a edició del Cercle de comparació intermunicipal de gestió i tractament de residus i neteja viària. Resultats any 2015*, Barcelona. España: Área de Territori y Sostenibilitat, Gerència de Serveis de Medi Ambient.

DNGI, 2016. *Mapas críticos de gestión de residuos en Argentina*, Ciudad de Buenos Aires: Dirección Nacional de Gestión integral de residuos. Secretaría de Coordinación Interjurisdiccional del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación..

Durbin, J. & Watson, G. S., 1951. Testing for serial correlation in least squares regression. *Biometrika*, II(38(1/2)), pp. 159-177.

EEA, 1998. *National strategies and local practices: MSW policy implementation by local government in the UK*, Copenhagen: Proceedings of the advances in European Environmental Policy Conference.

Esfe, M. H., Saedodin, S., Bahiraei, M., Toghraie, D., Mahian, O., Wongwises, S., 2014. Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 118(1), 287-294.

Espinoza, P., Martínez Arce, E., Daza, D., Soulier Faure, M., Terraza, H., 2011. *Informe de la evaluación regional del manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010*, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo

(BID)/Organización Panamericana de la Salud (OPS)/Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS).

Farrell, M., 1957. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(Par. III), pp. 253-2990.

Feng, L. & Zhang, J., 2014. Application of artificial neural networks in tendency forecasting of economic growth. *Economic Modelling*, pp. 40, 76-80.

Fund. Observatorio Pyme, Universidad Tecnológica Nacional, Bononiae Libris, 2008. *Industria manufacturera año 2007. Observatorio Pyme regional. Surostes de la Provincia de Buenos Aires*, Buenos Aires: s.n.

Fundación Forum Ambiental, 2017. *Las entidades locales necesitan apoyo para la gestión sostenible de los residuos municipales*, España: s.n.

García Estévez, P., 2002. Aplicaciones de las Redes Neuronales en finanzas. *Documentos de trabajo de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, pp. (5), 1-42.

Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., Vigo, D., 2014. A survey of strategic and tactical issues. *Computers & Operations Research*, pp. 44, 22-32.

Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001. *Generalidades sobre indicadores para gestión de residuos sólidos domiciliarios*, s.l.: s.n.

González González, M. J. & Lázaro Torres, M. L., 2005. *Los hitos y los retos del desarrollo sostenible en la planificación urbana*. León: Universidad.

González, G. L., 2010. *Residuos Sólidos Urbanos Argentina - Tratamiento y disposición final - Situación actual y alternativas futuras*, Buenos Aires: Cámara Argentina de la Construcción.

Guerrero, L. A., Maas, G. & Hogland, W., 2013. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, pp. Vol: 33, Issue: 1, Page: 220-32.

Hagan, M. & Menhaj, M., 1994. Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), pp. 989-993.

Hickman, L. H., 2003. *American Alchemy: The History of Solid Waste Management in the United States*. Santa Barbara, California, USA: Tracy Alpern.

Hoomweg, D. & Bhada-Tata, P., 2012. *What a waste: A global review of solid waste management. Urban development series.*, Washington, DC: World Bank.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), 2014. *Experiencias nacionales en la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*, s.l.: III Jornadas Nacionales GIRSU, Chubut 2013.

Jafarzadeh, G. S. & Hashempour, S., 2015. *Optimization and forecasting of urban solid waste management by artificial neural networks..* UAE, Dubai.

Jahandideh, S., Jahandideh, S., Asadabadi, E. B., Askarian, M., Movahedi, M. M., Hosseini, S., Jahandideh, M., 2009. The use of artificial neural networks and multiple linear regression to predict rate of medical waste generation. *Waste Management*, pp. 29(11), 2874-2879.

Kerlinger, F. & Lee, H., 2002. *Investigación del Comportamiento*. McGraw Hill ed. México: s.n.

Kuo, R. J., Wang, Y. C. & Tien, F. C., 2010. Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, pp. 18(12), 1161-1170.

Kwon, H. B., Lee, J. & Roh, J. J., 2016. Best performance modeling using complementary DEA-ANN approach: Application to Japanese electronics manufacturing firms. *Benchmarking: An International Journal*, pp. 23(3), 704-721.

Liu, Z. F., Liu, X. P., Wang, S. W. & Liu, G. F., 2002. Recycling strategy and a recyclability assessment model based on an artificial neural network.. *Journal of materials processing technology*, pp. 129(1), 500-506.

Martimportugués Goyenechea, C., Canto Ortiz, J. M. & Hombrados Mendieta, M. I., 2008. Habilidades pro-ambientales en la separación y depósito de residuos sólidos urbanos. *Medio Ambiente y Comportamiento Humano*, pp. 8(1y2), 71-92.

Mazhar, M. I., Kara, S. & Kaebernick, H., 2007. Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks. *Journal of operations management*, pp. 25(6), 1184-1193.

Merino, A. P. & Ruiz Díaz, M. Á., 2005. Capítulo 18. Análisis de Regresión Lineal. El procedimiento Regresión Lineal. En: M. Hill, ed. *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. McGraw-Hill / Interamericana ed. Madrid: s.n.

Ministry for the Environment, 2000. *Environmental performance indicators: Confirmed indicators for waste, hazardous waste and contaminated sites*, Wellington. Nueva Zelanda: Manatú Mo Te Taiao.

Morrissey, A. J. & Browne, J., 2004. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*, pp. 24: 297-308.

Mostafa, M. M., 2009. Modeling the efficiency of top Arab banks: A DEA-neural network approach. *Expert Systems with Applications*, pp. 36(1), 309-320.

Naredo, J. M., 2007. La reconciliación virtual entre economía y ecología en el nuevo desarrollismo ecológico. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, Volumen 100, pp. 33-51.

Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2009. *Sostenibilidad en España 2009*, Madrid: Mundi-Prensa.

Olmeda, I., Bonilla, M. & Marco, P., 2002. Redes Neuronales Artificiales: Predicción de la Volatilidad del Tipo de Cambio de la Peseta. *Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas*, pp. No. 2002-08.

Orcosupa, J., 2002. *Relationship among the per capita generation of household solid waste and socioeconomic variables*, Santiago de Chile, Chile: Master Thesis in Management and Environmental Planning.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 1994. *Eur-Lex*. [En línea] Available at:  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1523649503399&uri=CELEX:31994L0062>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008. *Eur-Lex*. [En línea] Available at:  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1523549903103&uri=CELEX:32008L0098>

Pasculli, M. N., 2015. *Valorización de aspectos ambientales de la gestión de residuos sólidos urbanos*, s.l.: Universidad Nacional de Salta.

Passarini, F., Vasura, I., Monti, F.; Morselli, L.; Villani, B., 2011. Indicators of waste management efficiency related to different territorial conditions. *Waste Management*, pp. 31, 785-792.

Pearson, K., 1897. Mathematical contributions to the theory of evolution.—On a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. *Proceedings of The Royal Society of London*, 60(359-367), pp. 489-498..

Puma-Chávez, A., Armijo-De Vega, C., Calderón-De la Barca, N., Leyva- Aguilera, J. C., Ojeda-Benitez, S., 2011. Instrumento de evaluación para los programas de manejo de Residuos Domiciliarios. 3((1)).

Qdais, H. A., Hamoda, M. & Newham, J., 1997. Analysis of residential solid waste at generation sites. *Waste Management & Research*, pp. 15(4), 395-406.

Ramanathan, R., 2003. *An Introduction to data envelopment analysis: A tool for performance measurement*. New Delhi: Sage Publications India Pvt Ltd.

Restrepo, M. I. & Villegas, J. G., 2007. *Análisis Envolverte de Datos: Introducción y herramienta pública para su utilización*, s.l.: Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Antioquia.

Rodrigues Bahia, S., 1996. Sustainability indicators for a waste management approach. *Instituto Brasileiro de Administracao Municipal*.

Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pachecho, J. F., Contreras, E., Gálvez, A., 2016. *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*, Santiago de Chile: CEPAL.

Rueda Lillo, F. J., 2016. *Absorción de contaminantes inorgánicos de un gas de gasificación de RDF mediante sosa cáustica.*, Sevilla, España: Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

Saarenmaa, H., Martin, J., Jensen, S., Peifer, H., McInnes, G., 2002. *Development of common tools and an information infrastructure for the shared European environment information system*, Copenhagen: European Environment Agency.

Sáez, A. & Urdaneta G., J. A., 2014. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnía*, pp. Vol.20, núm. 3, 121-135.

Saladiè, Ò. & Santos-Lacueva, R., 2016. The role of awareness campaigns in the improvement of separate collection rates of municipal waste among university students: A Causal Chain Approach. *Waste Management*, pp. 48-55.

Sanjeevi, V. & Shahabudeen, P., 2015. Development of performance indicators for municipal solid waste management (PIMS): A review. *Waste Management & Research*, pp. 1-14.

Sanz Molina, A. & Martín del Brío, B., 2006. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Madrid, España: Ra-Ma, Librería y Editorial Microinformática.

Sartor, A., 2000. *Generación de Residuos y Sustentabilidad del Sistema Urbano. Las ciudades ante nuevos desafíos de Gestión. Caso Bahía Blanca*, Bahía Blanca: Tesis de la Maestría en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano, UTN FR Bahía Blanca.

Saturno, P. J., 2004. La invasión de los indicadores compuestos. Riesgos y beneficios para la gestión de la calidad. *Revista de Calidad Asistencial*, pp. 19(6), 407-415.

Schejtman, L. & Cellucci, M., 2014. *Gestión integral de residuos sólidos urbanos. Políticas municipales que promueven la sustentabilidad*, Buenos Aires: CIPPEC: s.n.

Schejtman, L. & Irurita, N., 2012. *Diagnóstico sobre la gestión de los residuos sólidos urbanos en municipios de la Argentina. Documento de Trabajo N°103*, Buenos Aires: CIPPEC: s.n.

Secretaría de ambiente y Desarrollo Sustentable de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2015. *Plan provincial de GIRSU para la provincia de Catamarca, incluyendo planificación, estudios de factibilidad, diseños de ingeniería de detalle y elaboración de pliegos para la implementación de la GIRSU*, Argentina: s.n.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina, 2014. *Sistema de indicadores de Desarrollo Sostenible. Séptima Edición.*, Ciudad autónoma de Buenos Aires.: s.n.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014. *Sistema de Indicadores de Desarrollo Sostenible Argentina*, Buenos Aires: s.n.

Seiford, L. M. & Joe, Z., 1999. An investigation of returns to scale in data envelopment analysis. *Omega*, Volumen 27(1), pp. 1-11.

Shapiro, S. & Wilk, M., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(No. 3/4), pp. 591-611.

Solda, S., 2010. *Manual para el cálculo del costo de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y para el uso de la matriz de costo GIRSU*, Observatorio Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Argentina: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.: s.n.

Soto, H. & Schuschny, A. R., 2009. *Guía metodológica: diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Sreekumar, S. & Mahapatra, S. S., 2011. Performance modeling of Indian business schools: a DEA-neural network approach. *Benchmarking: An International Journal*, pp. 18(2), 221-239.

Teixeira, C. A., Avelino, C., Ferreira, F. & Bentes, I., 2014. Statistical analysis in MSW collection performance assessment. *Waste Management*, pp. 34. 1584-1594.

Unión Europea, 2017. *Revisión de la aplicación de la normativa medioambiental de la UE. Informe de España*, Bruselas: Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea..

United Nations Center for Human Settlements (UNCHS), 1989. *Collection Vehicles for Developing Countries*, Nairobi: UN Publications.

Universidad Nacional de San Martín - AMBA, 2015. *Avances hacia la gestión integral de residuos en la región metropolitana de Buenos Aires*, Buenos Aires: s.n.

Villavicencio, G. J. D. & Didonet, S. R., 2009. Eco-eficiencia en la gestión de residuos municipales en Catalunya. *Revista de Administração da UFMS*, p. 1(2).

Vitorino de Souza Melaré, A., Montenegro González, S., Faceli, K. & Casadei, V., 2017. Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. *Waste Management*, Volumen 59, pp. 59: 567-584.

Wilson, D. G., 2008. A brief history of solid-waste management. *International Journal of Environmental Studies*, pp. 9:2, 123-129.

Wu, D., 2009. Supplier selection: A hybrid model using DEA, decision tree and neural network. *Expert Systems with Applications*, pp. 36(5), 9105-9112.

Wu, D. D., Yang, Z. & Liang, L., 2006. Using DEA-neural network approach to evaluate branch efficiency of a large Canadian bank. *Expert systems with applications*, pp. 31(1), 108-115.

Zade, M. J. G. & Noori, R., 2007. Predicción de la generación de residuos sólidos municipales mediante el uso de redes neuronales artificiales: un estudio de caso de Mashhad. *Int. J. Environ*, pp. 2 (1), 13-22.

Zurbrügg, C. & Schertenleib, R., 1998. *Main problems and issues of Municipal solid Waste Management in developing countries with emphasis on problems related to disposal by landfill*. Lulea, Sweden, Dept. of Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC) & Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology (EAWAG).

# ANEXOS

## ANEXO 1. Análisis de sensibilidad en SOBA

La celda en blanco indica la DMU que ha sido retirada del análisis.

Efic. 0 = Eficiencia Inicial considerando las 18 DMUs.

Referencias de Valores de eficiencia

- $\Theta = 1$
- $\Theta [0,99 ; 0,70 ]$
- $\Theta < 0,7$

Tabla 55. Análisis de sensibilidad A1-CCR-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,34	0,49		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
3	0,85	1,00	0,85		0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
4	0,38	0,47	0,38	0,34		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
5	0,66	1,00	0,66	0,66	0,66		0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
6	0,41	0,62	0,41	0,41	0,41	0,41		0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
7	0,29	0,33	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29		0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
8	0,44	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
9	0,25	0,29	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
10	0,65	0,97	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65		0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
11	0,75	0,90	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
12	0,34	0,41	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
13	0,75	0,98	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	0,75	0,75	0,75
14	0,59	0,67	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59		0,59	0,59	0,59
15	0,13	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13		0,13	0,13
16	0,86	1,00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86
17	0,81	1,00	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	
18	0,69	0,98	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	

Tabla 56. Análisis de sensibilidad A1-BCC-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,47	0,54		0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,57	0,47	0,47
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,59	0,59	0,59	0,59		0,59	0,59	0,59	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,77	0,59
5	0,71	1,00	0,71	0,71	0,71		0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,75	0,71
6	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53		0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,66	0,53
7	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,65	0,42
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59		0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,77	0,59
10	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
11	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86	0,86	0,86	0,86	0,88	0,86
12	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,42	0,56	0,42
13	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76		0,76	0,76	1,00	0,76
14	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80		0,80	1,00	0,80
15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15		1,00	0,15
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			1,00
17	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,88	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 57. Análisis de sensibilidad A2-CCR-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,35	0,49		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
3	0,85	1,00	0,85		0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,51	0,62	0,51	0,51	0,51	0,51		0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
7	0,29	0,33	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29		0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
8	0,44	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
9	0,25	0,29	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
10	0,74	0,97	0,74	0,74	0,74	0,76	0,74	0,74	0,74	0,74		0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
11	0,84	0,96	0,84	0,84	0,84	0,92	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
12	0,34	0,41	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
13	0,75	0,98	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	0,75	0,75	0,75
14	0,64	0,68	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64		0,64	0,64	0,64
15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15		0,15	0,15
16	0,86	1,00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86	0,86
17	0,95	1,00	0,95	0,95	0,96	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95		0,95
18	0,69	0,98	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	

Tabla 58. Análisis de sensibilidad A2-BCC-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,48	0,50		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,61	0,63	0,61	0,61	0,61	0,70		0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
7	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,60		0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,73	0,59
10	0,92	0,98	0,92	0,92	0,92	0,96	0,92	0,92	0,92	0,92		0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
11	0,94	0,99	0,94	0,99	0,94	1,00	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94		0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
12	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
13	0,76	1,00	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76		0,76	0,76	0,80	0,76
14	0,86	0,86	0,86	0,86	1,00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86	1,00	0,86
15	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18		0,22	0,18
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
17	0,95	1,00	0,95	0,95	0,99	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 59. Análisis de sensibilidad A3-CCR-SOBA

	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,44	0,50		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,57	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
3	0,85	1,00	0,85		0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,56	0,63	0,56	0,56	0,59	0,58		0,56	0,56	0,56	0,66	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
7	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46		0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
8	0,60	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60		0,60	0,77	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
9	0,32	0,34	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32		0,34	0,32	0,32	0,32	0,37	0,32	0,32	0,32	0,32
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	0,43	0,54	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,55	0,43		0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
13	0,74	1,00	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74		0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22		0,22	0,22	0,22
16	0,86	1,00	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79		0,79	0,79
17	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
18	0,69	0,98	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	

Tabla 60. Análisis de sensibilidad A3-BCC-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,60	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,58	0,52
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63		0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
7	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51		0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66		0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47		0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
13	0,76	1,00	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76		0,76	0,76	0,76	0,76
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
15	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22		0,22	0,22
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 61. Análisis de sensibilidad A4-CCR-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,35	0,49		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
3	0,85	1,00	0,85		0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,51	0,63	0,51	0,51	0,51	0,55		0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
7	0,30	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
8	0,44	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
9	0,25	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	0,84	1,00	0,84	0,84	0,84	0,96	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
12	0,34	0,49	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
13	0,75	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		0,75	0,75	0,75	0,75
14	0,64	0,69	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64		0,64	0,64	0,64
15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,35	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		0,16	0,16
16	0,86	1,00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
18	0,61	0,98	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	

Tabla 62. Análisis de sensibilidad A4-BCC-SOBA

Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,55	0,55		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,66	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,58	0,55
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64		0,64	0,64	0,64	0,73	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,68	0,64
7	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55		0,55	0,55	0,89	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,59	0,55
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72		0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,76	0,72
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,57	0,50		0,50	0,50	0,50	0,56	0,50
13	0,77	1,00	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77		0,77	0,77	0,81	0,77
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 63. Análisis de sensibilidad A5-CCR-SOBA

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9,87		9,87	9,61	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87
2	1,03	1,03		1,00	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	16,71	16,71	16,71	3,61		16,71	16,71	16,71	16,71
5	4,24	4,24	4,24	1,00	4,24		4,24	4,24	4,24
6	4,19	4,19	4,19	4,08	4,19	4,19		4,19	4,19
7	65,12	65,12	65,12	16,22	65,12	65,12	65,12		65,12
8	13,71	13,71	13,71	7,07	13,71	13,71	13,71	13,71	

Tabla 64. Análisis de sensibilidad A5-BCC-SOBA

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,11		5,11	3,13	5,11	1,00	1,00	5,11	5,11
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	13,00	13,00	13,00	2,88		13,00	13,00	13,00	13,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
7	18,99	18,99	18,99	5,39	18,99	18,99	18,99		18,99
8	4,00	4,00	4,00	1,14	4,00	4,00	4,00	4,00	

## ANEXO 2. Porcentajes de proyección y holguras por localidad según cada análisis realizado en SOBA

### Referencias:

DMU: Localidad; Efic.: Eficiencia obtenida; C: Capacidad de camiones de recolección de RSU; F: Frecuencia de recolección de RSU; M: horas del personal de recolección de RSU; N: capacidad de contenedores de RSI; O: RSU recolectados por año.

Variación porcentual

	[-0,001 , 0,001]
	(-0,001 , -15] $\cap$ (0,001 , 15]
	(-15,001, $\infty$ ) $\cap$ (15,001, $\infty$ )

Tabla 65. Holguras en análisis A1-CCR-SOBA

DMU	Efic.	C	F	M	O
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,34	-66,3	-66,3	-85,7	0,0
3	0,85	-15,4	-41,0	-83,3	0,0
4	0,38	-67,3	-62,3	-83,3	0,0
5	0,66	-34,0	-39,5	-82,0	0,0
6	0,41	-58,8	-58,8	-83,3	0,0
7	0,29	-71,4	-83,5	-83,3	0,0
8	0,44	-55,7	-62,3	-83,3	0,0
9	0,25	-75,1	-75,1	-83,3	0,0
10	0,65	-35,5	-35,5	-83,3	0,0
11	0,75	-24,6	-80,1	-83,3	0,0
12	0,34	-65,6	-78,9	-85,7	0,0
13	0,75	-57,1	-25,3	-66,7	0,0
14	0,59	-62,3	-41,5	-83,3	0,0
15	0,13	-91,4	-87,3	-66,7	0,0
16	0,86	-40,2	-14,2	-66,7	0,0
17	0,81	-67,8	-18,9	-80,0	0,0
18	0,69	-30,6	-30,6	-75,0	0,0

Tabla 66. Holguras en análisis A1-BCC-SOBA

DMU	Efic.	C	F	M	O
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,47	-53,3	-53,3	-37,9	0,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,59	-41,1	-41,1	-44,6	12,5
5	0,71	-28,8	-28,8	-5,5	0,0
6	0,53	-47,5	-47,5	-32,8	0,0
7	0,42	-57,9	-77,3	-25,5	0,0
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,59	-41,1	-41,1	-44,6	80,6
10	0,84	-16,5	-16,5	-31,6	0,0
11	0,86	-14,4	-69,4	0,0	0,0
12	0,42	-58,1	-65,1	-18,5	0,0
13	0,76	-52,1	-23,7	10,5	0,0
14	0,80	-29,4	-20,0	-50,0	19,2
15	0,15	-85,4	-85,0	0,0	1,8
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,83	-63,5	-16,9	-34,6	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 67. Holguras en análisis A2-CCR-SOBA.

DMU	Efic.	C	F	M	O	Orr
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,35	-65,3	-65,3	-85,7	0,0	0,0
3	0,85	-15,4	-41,0	-83,3	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,51	-49,3	-49,3	-70,4	0,0	0,0
7	0,29	-71,4	-83,5	-83,3	0,0	0,0
8	0,44	-55,7	-62,3	-83,3	0,0	0,0
9	0,25	-75,1	-75,1	-83,3	0,0	0,0
10	0,74	-26,5	-26,5	-78,9	0,0	0,0
11	0,84	-16,1	-78,1	-83,3	0,0	0,0
12	0,34	-65,6	-78,9	-85,7	0,0	0,0
13	0,75	-57,1	-25,3	-66,7	0,0	0,0
14	0,64	-61,7	-36,2	-83,3	0,0	0,0
15	0,15	-90,5	-84,7	-60,9	0,0	0,0
16	0,86	-40,2	-14,2	-66,7	0,0	0,0
17	0,95	-57,7	-4,8	16,6	0,0	0,0
18	0,69	-30,6	-30,6	-75,0	0,0	0,0

Tabla 69. Holguras en análisis A2-BCC-SOBA.

DMU	Efic.	C	M	F	O	Or	T
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,48	-52,1	-52,1	-37,8	0,0	0,0	0,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,61	-39,3	-39,3	-35,1	0,0	0,0	0,0
7	0,42	-57,9	-77,3	-25,5	0,0	0,0	0,0
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,59	-41,1	-41,1	-44,6	80,6	0,0	0,0
10	0,92	-7,9	-7,9	-32,4	0,0	0,0	0,0
11	0,94	-5,9	-67,6	-0,9	0,0	0,0	0,0
12	0,42	-58,1	-65,1	-18,5	0,0	0,0	0,0
13	0,76	-52,1	-23,7	10,5	0,0	0,0	0,0
14	0,86	-25,9	-14,0	-46,3	18,0	0,0	0,0
15	0,18	-83,5	-82,1	18,5	0,0	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,95	-57,6	-4,7	18,3	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 68. Holguras en análisis A3-CCR-SOBA.

DMU	Efic.	C	M	F	Ot	Or(tn)
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,44	-56,0	-59,6	-56,9	0,0	0,0
3	0,85	-15,4	-41,0	-83,3	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,56	-43,5	-43,5	-43,0	0,0	0,0
7	0,46	-53,5	-78,6	-25,0	0,0	197,0
8	0,60	-40,2	-66,0	-74,9	0,0	65,0
9	0,32	-67,8	-67,8	-68,6	0,0	0,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	-0,4	-75,5	-20,1	0,0	0,0
12	0,43	-57,4	-77,0	-56,6	0,0	126,8
13	0,75	-57,1	-25,3	-66,7	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,22	-78,2	-78,2	98,9	0,0	0,0
16	0,86	-40,2	-14,2	-66,7	0,0	0,0
17	0,98	-54,1	-2,4	60,0	0,0	0,0
18	0,69	-30,6	-30,6	-75,0	0,0	0,0

Tabla 70. Holguras en análisis A3-BCC-SOBA.

DMU	Efic.	C	M	F	Ot	Or(tn)
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,52	-48,0	-48,0	-23,6	0,0	126,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,63	-36,9	-36,9	-19,5	0,0	0,0
7	0,51	-49,5	-73,2	0,0	0,0	175,0
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,66	-34,3	-34,3	-28,5	70,5	20,7
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,47	-53,2	-67,7	-14,3	0,0	0,0
13	0,76	-52,1	-23,7	10,5	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,22	-78,2	-78,2	99,4	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 71. Holguras en análisis A4-CCR-SOBA.

DMU	Efic.	C	M	F	T	Ot	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,35	-65,3	-65,3	-85,7	-100	0,0	0,0
3	0,85	-15,4	-41,0	-83,3	-75,0	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,51	-49,3	-49,3	-70,4	-100,0	0,0	0,0
7	0,30	-70,2	-84,4	-83,3	-100,0	0,0	20,8
8	0,44	-55,7	-62,3	-83,3	-66,7	0,0	0,0
9	0,25	-75,6	-74,5	-83,3	-66,7	0,0	5,7
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,84	-16,1	-78,1	-83,3	-100,0	0,0	0,0
12	0,34	-65,6	-78,9	-85,7	-50,0	0,0	0,0
13	0,75	-57,1	-25,3	-66,7	-75,0	0,0	0,0
14	0,64	-61,9	-36,0	-83,3	0,0	0,0	0,0
15	0,16	-86,8	-84,4	-62,0	-100,0	0,0	0,0
16	0,86	-40,2	-14,2	-66,7	-75,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,61	-30,6	-30,6	-75,0	-75,0	0,0	0,0

Tabla 72. Holguras en análisis A4-BCC-SOBA.

DMU	Efic.	C	M	F	T	Ot	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,55	-45,4	-45,4	-16,9	-45,4	0,0	0,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,64	-35,9	-35,9	-12,7	-35,9	0,0	0,0
7	0,55	-45,0	-72,8	0,0	-45,0	0,0	0,0
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,72	-28,0	-28,0	-13,3	-28,0	0,0	0,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,50	-50,4	-70,1	-14,3	-50,4	0,0	0,0
13	0,77	-51,0	-22,9	30,6	-22,9	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 73. Holguras en análisis A5-CCR-SOBA.

DMU	Efic.	Cr	Mr	Orr
8	9,87	-85,7	0,0	886,7
4	1,03	-84,1	0,0	2,7
6	1,00	0,0	0,0	0,0
10	16,71	-3,6	0,0	1571,4
11	4,24	0,0	-27,3	323,9
14	4,19	-93,7	0,0	319,3
15	65,12	-20,9	0,0	6412,4
17	13,71	-67,9	0,0	1271,0

Tabla 74. Holguras en análisis A5-BCC-SOBA.

DMU	Efic.	Cr	Mr	Orr
8	5,11	0,00	0,00	411
4	1,00	0,00	0,00	0,00
6	1,00	0,00	0,00	0,00
10	13,00	-25,00	-22,22	1200
11	1,00	0,00	0,00	0,00
14	1,00	0,00	0,00	0,00
15	18,99	-76,92	-70,83	1799
17	4,00	-90,63	-70,83	300

### ANEXO 3. Porcentajes de proyección y holguras según cada input y output en SOBA

Tabla 75. Holguras obtenidas para la capacidad de los camiones de recolección de RSU en SOBA

C	Análisis									
	1		2		3		4		5	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
2	-66,3	-53,3	-65,3	-52,1	-56,0	-48,0	-65,3	-45,4	-85,7	0,0
3	-15,4	0,0	-15,4	0,0	-15,4	0,0	-15,4	0,0		
4	-67,3	-41,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-84,1	0,0
5	-34,0	-28,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
6	-58,8	-47,5	-49,3	-39,3	-43,5	-36,9	-49,3	-35,9	0,0	0,0
7	-71,4	-57,9	-71,4	-57,9	-53,5	-49,5	-70,2	-45,0		
8	-55,7	0,0	-55,7	0,0	-40,2	0,0	-55,7	0,0		
9	-75,1	-41,1	-75,1	-41,1	-67,8	-34,3	-75,6	-28,0		
10	-35,5	-16,5	-26,5	-7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,6	-22,2
11	-24,6	-14,4	-16,1	-5,9	-0,4	0,0	-16,1	0,0	0,0	0,0
12	-65,6	-58,1	-65,6	-58,1	-57,4	-53,2	-65,6	-50,4		
13	-57,1	-52,1	-57,1	-52,1	-57,1	-52,1	-57,1	-51,0		
14	-62,3	-29,4	-61,7	-25,9	0,0	0,0	-61,9	0,0	-67,9	0,0
15	-91,4	-85,4	-90,5	-83,5	-78,2	-78,2	-86,8	0,0	-20,9	-70,8
16	-40,2	0,0	-40,2	0,0	-40,2	0,0	-40,2	0,0		
17	-67,8	-63,5	-57,7	-57,6	-54,1	0,0	0,0	0,0	-67,9	-70,8
18	-30,6	0,0	-30,6	0,0	-30,6	0,0	-30,6	0,0		

Tabla 76. Holguras obtenidas en cada análisis para la frecuencia de recolección de RSU en SOBA

F	Análisis							
	1		2		3		4	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-85,7	-37,9	-85,7	-37,8	-56,9	-23,6	-85,7	-16,9
3	-83,3	0,0	-83,3	0,0	-83,3	0,0	-83,3	0,0
4	-83,3	-44,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-82,0	-5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	-83,3	-32,8	-70,4	-35,1	-43,0	-19,5	-70,4	-12,7
7	-83,3	-25,5	-83,3	-25,5	-25,0	0,0	-83,3	0,0
8	-83,3	0,0	-83,3	0,0	-74,9	0,0	-83,3	0,0
9	-83,3	-44,6	-83,3	-44,6	-68,6	-28,5	-83,3	-13,3
10	-83,3	-31,6	-78,9	-32,4	0,0	0,0	0,0	0,0
11	-83,3	0,0	-83,3	-0,9	-20,1	0,0	-83,3	0,0
12	-85,7	-18,5	-85,7	-18,5	-56,6	-14,3	-85,7	-14,3
13	-66,7	10,5	-66,7	10,5	-66,7	10,5	-66,7	30,6
14	-83,3	-50,0	-83,3	-46,3	0,0	0,0	-83,3	0,0
15	-66,7	0,0	-60,9	18,5	98,9	99,4	-62,0	0,0
16	-66,7	0,0	-66,7	0,0	-66,7	0,0	-66,7	0,0
17	-80,0	-34,6	16,6	18,3	60,0	0,0	0,0	0,0
18	-75,0	0,0	-75,0	0,0	-75,0	0,0	-75,0	0,0

Tabla 77. Holguras obtenidas en cada análisis para la disponibilidad de personal de recolección de RSU en SOBA

M	Análisis									
	1		2		3		4		5	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
2	-66,3	-53,3	-65,3	-52,1	-59,6	-48,0	-65,3	-45,4	0,0	0,0
3	-41,0	0,0	-41,0	0,0	-41,0	0,0	-41,0	0,0		
4	-62,3	-41,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-39,5	-28,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
6	-58,8	-47,5	-49,3	-39,3	-43,5	-36,9	-49,3	-35,9	0,0	0,0
7	-83,5	-77,3	-83,5	-77,3	-78,6	-73,2	-84,4	-72,8		
8	-62,3	0,0	-62,3	0,0	-66,0	0,0	-62,3	0,0		
9	-75,1	-41,1	-75,1	-41,1	-67,8	-34,3	-74,5	-28,0		
10	-35,5	-16,5	-26,5	-7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-22,2
11	-80,1	-69,4	-78,1	-67,6	-75,5	0,0	-78,1	0,0	-27,3	0,0
12	-78,9	-65,1	-78,9	-65,1	-77,0	-67,7	-78,9	-70,1		
13	-25,3	-23,7	-25,3	-23,7	-25,3	-23,7	-25,3	-22,9		
14	-41,5	-20,0	-36,2	-14,0	0,0	0,0	-36,0	0,0	0,0	0,0
15	-87,3	-85,0	-84,7	-82,1	-78,2	-78,2	-84,4	0,0	0,0	-70,8
16	-14,2	0,0	-14,2	0,0	-14,2	0,0	-14,2	0,0		
17	-18,9	-16,9	-4,8	-4,7	-2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-70,8
18	-30,6	0,0	-30,6	0,0	-30,6	0,0	-30,6	0,0		

Tabla 78. Holguras obtenidas en cada análisis para la cantidad de RSU y RSUR recolectados en SOBA.

Ot	Análisis									
	1		2		3		4		5	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	886,7	410,6
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
4	0,0	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
9	0,0	80,6	0,0	80,6	0,0	70,5	0,0	0,0		
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1571,4	1200,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	323,9	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
14	0,0	19,2	0,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	319,3	0,0
15	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6412,4	1799,4
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1271,0	299,9
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

#### ANEXO 4. Análisis de sensibilidad en Cataluña

La celda en blanco indica la DMU que ha sido retirada del análisis. Efic. 0 = Eficiencia Inicial considerando las 18 DMUs.

Referencias de Valores de eficiencia

⊖1
⊖∈ [0,99 ; 0,70 ]
⊖0,7

Tabla 79. Análisis de sensibilidad AI-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,70	0,70		0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,72	0,70
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,31	0,43	0,31	0,31		0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31
5	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90		0,90	0,90	0,90	0,92	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
6	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78		0,78	0,78	0,83	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,91	0,95	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91		0,95	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,94
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
11	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,75	0,72		0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,74	0,72
12	0,40	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40		0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
13	0,59	0,72	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,61	0,59	0,59	0,59		0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00
16	0,61	0,64	0,61	0,70	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61		0,61	0,61	0,61
17	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,59	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57		0,59	0,57
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	0,51	0,51	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	

Tabla 80. Análisis de sensibilidad A1-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84		0,83	0,83	0,88	0,83	0,83	0,83	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84	0,83
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,91	0,95	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91		0,95	0,91	0,91	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,97	0,91
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Tabla 81. Análisis de sensibilidad A2-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,58	0,58		0,58	0,58	0,58	0,64	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,58
3	0,54	0,58	0,54		0,54	0,54	0,62	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
4	0,43	0,51	0,43	0,43		0,43	0,45	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44	0,43
5	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68		0,82	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69	0,68
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,79	0,86	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79		0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
8	0,72	0,73	0,72	0,72	0,72	0,72	0,81	0,72		0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,80	0,72
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,94	0,79	0,79	0,79		0,79	0,79	0,79	0,81	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
11	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,56	0,51	0,51	0,51	0,51		0,51	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
12	0,32	0,38	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32		0,32	0,34	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
13	0,83	0,92	0,83	0,83	0,83	0,83	0,93	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83		0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,85	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,73		0,71	0,71	0,71	0,71
16	0,77	0,83	0,77	0,77	0,77	0,77	0,86	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77		0,77	0,77	0,77
17	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,55	0,51	0,51		0,51	0,51
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,43	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	

Tabla 82. Análisis de sensibilidad A2-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	0,74	0,74	0,74		0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,75	0,74	0,74	0,81	0,74	0,74	0,74
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,80	0,96	0,80	0,80	0,80	0,80	0,83		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,83	0,80		0,80	0,81	0,80	0,80	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,86	0,80
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,85	0,77	0,77	0,77	0,79	0,77	0,77	0,77	0,80		0,77	0,77	0,77	0,77
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Tabla 83. Análisis de sensibilidad A3-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,73	1,73		1,73	1,73	1,73	1,52	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,68	1,73
3	1,86	1,73	1,86		1,86	1,86	1,62	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
4	1,18	1,18	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
5	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48		1,22	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,45
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,27	1,16	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26		1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
8	1,38	1,37	1,38	1,38	1,38	1,38	1,22	1,38		1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,24
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,26	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26	1,00	1,26	1,26	1,26		1,26	1,26	1,26	1,23	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
11	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,63	1,94	1,94	1,94	1,94		1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
12	2,04	2,02	2,04	2,04	2,04	2,04	1,95	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04		2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,18	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,37		1,40	1,40	1,40	1,40
16	1,23	1,20	1,23	1,23	1,23	1,23	1,09	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23		1,23	1,23	1,23
17	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,28	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41		1,41	1,41
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	1,78	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10

Tabla 84. Análisis de sensibilidad A3-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,62	1,59	1,62		1,62	1,62	1,56	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,53	1,62	1,62	1,62
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,18	1,03	1,18	1,18	1,18	1,18	1,16		1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,10	1,18
8	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,22	1,37		1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,23	1,37
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,17	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,31		1,40	1,40	1,40	1,40
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Tabla 85 Análisis de sensibilidad A4-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	1,08		1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,00	1,08
2	1,73	1,73		1,73	1,73	1,73	1,54	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,68	1,73
3	3,05	3,05	3,05		3,05	3,05	2,37	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,04	3,05
4	1,18	1,18	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
5	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53		1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,45	1,53
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,81		1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,55	1,92
8	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,34	1,45		1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,24	1,45
9	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,22	1,39	1,39		1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,23	1,39
10	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,11	1,46	1,46	1,46		1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,45	1,46
11	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	1,67	2,02	2,02	2,02	2,02		2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	1,99	2,02
12	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09		2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,22	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46		1,46	1,46	1,46	1,46	1,43	1,46
15	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,50	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64		1,64	1,64	1,64	1,58	1,64
16	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,19	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35		1,35	1,35	1,35	1,35
17	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,28	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41		1,41	1,41	1,41
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
19	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	1,78	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	

Tabla 86. Análisis de sensibilidad A4-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	2,82	2,82	2,78		2,82	2,82	2,32	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,79	2,82	2,82	2,82	2,82	2,73	2,82
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,09	1,09	1,00	1,09	1,09		1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,04	1,09
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43		1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,11	1,43
8	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,34	1,45		1,45	1,45	1,44	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,23	1,45
9	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,22	1,37	1,37		1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,21	1,37
10	1,05	1,05	1,00	1,05	1,05	1,05	1,00	1,05	1,05	1,05		1,05	1,05	1,01	1,05	1,05	1,05	1,05	1,01	1,05
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,29	1,29	1,27	1,29	1,29	1,29	1,16	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29		1,29	1,29	1,29	1,28	1,29
15	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,48	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56		1,56	1,56	1,53	1,56
16	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,11	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,15	1,24	1,24		1,07	1,24	1,24
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,37	1,41	1,41	1,41	1,41	1,37	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,00	1,41	

Tabla 87. Análisis de sensibilidad A5-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
2	1,81	1,81		1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,25	1,81
3	1,67	1,67	1,67		1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,17	1,67
4	1,48	1,48	1,48	1,48		1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,36	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
5	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96		1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,36	1,96
6	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33		1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,32	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,00	1,33
7	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74		1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,14	1,74
8	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80		1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,00	1,80
9	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70		1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,02	1,70
10	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41		1,41	1,41	1,39	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,12	1,41
11	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79		1,79	1,76	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,42	1,79
12	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32		2,12	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,63		1,64	1,64	1,64	1,64	1,16	1,64
15	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43		1,43	1,43	1,00	1,43	
16	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,49	1,54	1,54		1,54	1,38	1,54	
17	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,24	1,30	1,30	1,30		1,21	1,30	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	
19	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,30	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,08	

Tabla 88. Análisis de sensibilidad A5-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
3	1,35	1,35	1,28		1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,11	1,35	
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
5	1,38	1,38	1,26	1,38	1,38		1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,31	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,12	1,38	
6	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30		1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,27	1,00	1,30
7	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51		1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,00	1,51
8	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60		1,60	1,60	1,54	1,60	1,58	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,00	1,60
9	1,63	1,63	1,61	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63		1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,01	1,63
10	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25		1,18	1,25	1,23	1,25	1,25	1,25	1,19	1,00	1,25	
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
14	1,40	1,40	1,36	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40		1,40	1,40	1,39	1,10	1,40	
15	1,26	1,26	1,22	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		1,26	1,26	1,00	1,26	
16	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,33	1,38	1,28	1,38	1,38		1,23	1,23	1,38	
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	
19	1,71	1,71	1,67	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,00	1,69		

Tabla 89. Análisis de sensibilidad A6-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	2,14	2,14		2,14	2,14	2,14	2,03	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,135	2,14	2,14	2,08	2,14	2,14	2,14	2,14
3	1,51	1,51	1,51		1,51	1,51	1,49	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,36	1,51	1,51	1,51	1,51
4	1,07	1,07	1,07	1,07		1,07	1,03	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,05	1,07	1,07	1,07
5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50		1,45	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,40	1,50	1,50	1,50	1,50
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,46		1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,48	1,50	1,50	1,42	1,50
8	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17		1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,00
9	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,59	1,61	1,61		1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,59	1,611	1,61	1,45	1,61
10	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,10	1,22	1,22	1,22		1,22	1,223	1,22	1,22	1,22	1,22	1,223	1,22	1,22
11	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,06	2,28	2,28	2,28	2,28		2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
12	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54		1,54	1,54	1,54	1,50	1,54	1,54	1,54
13	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05		1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,06	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14		1,12	1,14	1,14	1,14	1,14
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00		1,02	1,02
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,00	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,02	1,04	1,04	

Tabla 90. Análisis de sensibilidad A6-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,39	1,39	1,39		1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,15	1,39	1,39	1,39	1,38
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,00	1,03	1,03	1,03	1,00	1,03	1,03	1,02	1,03
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,00	1,20
8	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02		1,02	1,02	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	1,02
9	1,55	1,548	1,55	1,55	1,55	1,55	1,54	1,55	1,55		1,55	1,54	1,55	1,55	1,55	1,53	1,548	1,55	1,43	1,55
10	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,01		1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,01
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,46	1,46	1,46	1,46	1,00	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46		1,46	1,46	1,46	1,46	1,00	1,46	1,46
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02		1,00	1,02	1,02	1,02	1,00
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Tabla 91. Análisis de sensibilidad A7-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,57	1,566		1,57	1,57	1,57	1,46	1,566	1,57	1,57	1,57	1,566	1,566	1,57	1,57	1,57	1,57	1,47	1,57	1,57
3	1,22	1,22	1,22		1,22	1,22	1,11	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,06	1,22
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45		1,35	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,42	1,30	1,45
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,09		1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,08	1,12
8	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,27	1,44		1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,43	1,42	1,44
9	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,15	1,26	1,26		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,24	1,11	1,26
10	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,18	1,30	1,30	1,30		1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,28	1,30	1,30
11	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66		1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,56	1,58	1,66
12	1,25	1,25	1,25	1,25	1,24	1,25	1,23	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25		1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
13	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02		1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
14	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,26	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40		1,40	1,40	1,39	1,35	1,40
15	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,47	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58		1,58	1,57	1,24	1,58
16	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03		1,00	1,03	1,03
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Tabla 92, Análisis de sensibilidad A7-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
2	1,57	1,57		1,57	1,57	1,57	1,46	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,00	1,57	1,57	
3	1,03	1,03	1,03		1,03	1,03	1,00	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,00	1,03	1,03	
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
5	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22		1,19	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,00	1,22	1,22	
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
8	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,22	1,26		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,23	1,26
9	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,11	1,19	1,19		1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,09	1,19
10	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,18	1,30	1,30	1,30		1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,10	1,30	1,30
11	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58		1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,00	1,36	1,58
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,24	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31		1,31	1,31	1,19	1,31	1,31	
15	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,46	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58		1,58	1,55	1,22	1,58	
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		

Tabla 93. Análisis de sensibilidad A8-CCR-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,26		1,26	1,26	1,26	1,26	1,16	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	7,65	7,65	7,65		7,65	7,65	6,57	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65	7,65
4	1,38	1,38	1,38	1,38		1,38	1,29	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,51		1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	1,19	1,194	1,19	1,19	1,19	1,19	1,047	1,19	1,19		1,18	1,194	1,19	1,19	1,19	1,19	1,194	1,19	1,14	1,19
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	1,89	2,08	2,08	2,08	2,03	2,08		2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
13	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08		1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
14	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,30	1,50	1,50	1,50	1,45	1,50	1,50	1,50		1,50	1,50	1,50	1,47	1,50
15	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,10	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90		2,90	2,90	2,90	2,90
16	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,03	1,06	1,06	1,06	1,00	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		1,06	1,06	1,06
17	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01		1,01	1,01
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	4,67	4,67	4,57	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,61	4,45	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	

Tabla 94. Análisis de sensibilidad A8-BCC-Cataluña

DMU	Efic. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,20		1,20	1,20	1,20	1,20	1,15	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,17	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
2	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	6,42	6,42	6,42		6,42	6,42	6,35	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	5,67	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
4	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,39		1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,31	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,01	1,18	1,17		1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,14
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,29	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,32		1,36	1,31	1,36	1,32	1,36
15	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	1,70	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90		2,90	2,90	2,90	2,90
16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

## ANEXO 5. Porcentajes de proyección y holguras por localidad en Cataluña

Tabla 95. Holguras obtenidas en análisis A1-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	C	F	M	N	O
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,70	-30,0	-71,7	-49,9	-30,0	0,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,31	-68,6	-68,6	-83,6	-68,6	0,0
5	0,90	-10,0	-52,3	-68,4	-10,0	0,0
6	0,78	-21,7	-28,7	-49,0	-21,7	0,0
7	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,91	-9,3	-9,3	-19,7	-9,3	0,0
9	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,81	-19,2	-45,9	-25,9	-19,2	0,0
11	0,72	-45,7	-84,3	-28,1	-28,1	0,0
12	0,40	-59,7	-66,0	-59,7	-59,7	0,0
13	0,59	-41,4	-41,4	-63,5	-41,4	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,61	-38,8	-41,7	-38,8	-38,8	0,0
17	0,57	-47,2	-87,6	-42,9	-42,9	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,51	-49,5	-85,3	-71,1	-49,5	0,0

Tabla 97. Holguras obtenidas en análisis A2-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	C	Fr	M	Nr	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,58	-42,4	-82,3	-55,0	-42,4	0,0
3	0,54	-46,2	-73,5	-80,2	-46,2	0,0
4	0,43	-57,3	-57,3	-74,3	-57,3	0,0
5	0,68	-32,4	-70,0	-70,8	-32,4	0,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,79	-71,4	-21,2	-21,2	-21,2	0,0
8	0,72	-35,6	-27,7	-27,7	-27,7	0,0
9	1,00	-23,8	-0,4	-0,4	-0,4	0,0
10	0,79	-22,6	-30,3	-21,2	-21,2	0,0
11	0,51	-74,6	-88,8	-48,5	-48,5	0,0
12	0,32	-68,7	-70,5	-67,9	-67,9	0,0
13	0,83	-17,0	-23,4	-35,2	-17,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,71	-33,2	-32,2	-28,7	-28,7	0,0
16	0,77	-23,5	-67,8	-66,7	-23,5	0,0
17	0,51	-56,4	-67,7	-48,7	-48,7	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,34	-65,7	-93,4	-81,5	-65,7	0,0

Tabla 96. Holguras obtenidas en análisis A1-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	C	F	M	N	O
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,83	-16,7	-16,7	-28,7	-16,7	0,0
7	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,91	-8,6	-8,6	-18,5	-8,6	0,0
9	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 98. Holguras obtenidas en análisis A3-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	C	Fr	M	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,73	-4,6	-68,5	-23,4	0,0	0,0	73,0
3	1,86	0,0	-50,7	-63,1	0,0	-29,3	86,0
4	1,18	-51,1	-35,9	-58,2	-74,6	0,0	17,8
5	1,48	0,0	-55,7	-56,8	0,0	-26,7	47,9
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,27	-63,7	0,0	0,0	0,0	-34,3	26,9
8	1,38	-11,0	0,0	0,0	0,0	-16,1	38,3
9	1,004	-23,5	0,0	0,0	0,0	-28,8	0,4
10	1,26	-4,4	-18,7	0,0	0,0	0,0	26,0
11	1,94	-50,7	-78,2	0,0	0,0	-13,7	94,3
12	2,04	-40,4	-64,9	0,0	-63,0	0,0	103,7
13	1,001	-7,7	-8,6	-8,7	-56,8	0,0	0,1
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	1,40	-6,4	-4,9	0,0	0,0	-22,0	40,2
16	1,23	0,0	-56,2	-50,6	-32,3	0,0	23,4
17	1,41	-47,1	-77,2	-9,6	-45,5	0,0	40,8
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	2,10	-27,2	-85,9	-59,8	-35,3	0,0	109,5

Tabla 99. Holguras obtenidas en análisis A2-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	C	FR	M	NR	OR
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,74	-25,9	-25,9	-48,6	-25,9	0,0
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,80	-72,4	-33,5	-20,1	-20,1	0,0
8	0,80	-20,1	-20,1	-20,8	-20,1	0,0
9	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,77	-27,0	-22,6	-22,6	-22,6	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 101. Holguras obtenidas en análisis A4-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,08	0,0	-60,8	0,0	7,8
2	1,73	-68,5	0,0	0,0	73,0
3	3,05	-12,8	0,0	0,0	205,5
4	1,18	-35,9	-74,6	0,0	17,8
5	1,53	-65,7	0,0	-2,9	53,1
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,92	0,0	-9,1	0,0	91,5
8	1,45	-8,1	0,0	0,0	45,5
9	1,39	-5,1	0,0	0,0	39,3
10	1,46	-31,2	0,0	0,0	45,8
11	2,02	-81,0	0,0	0,0	101,8
12	2,09	-63,4	-64,6	0,0	109,5
13	1,001	-8,6	-56,8	0,0	0,1
14	1,46	-44,8	0,0	0,0	46,0
15	1,64	-38,4	0,0	0,0	63,5
16	1,35	-50,0	-40,9	0,0	34,9
17	1,41	-77,2	-45,5	0,0	40,8
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	2,10	-85,9	-35,3	0,0	109,5

Tabla 100. Holguras obtenidas en análisis A3-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	C	Fr	M	Nr	O	OR
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1,62	0,0	-14,9	-38,4	0,0	-36,8	62,5
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,18	-57,5	-38,1	0,0	0,0	-34,7	17,9
8	1,37	-11,4	0,0	0,0	0,0	-17,1	37,5
9	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	1,40	-7,5	-8,5	0,0	0,0	-23,4	39,7
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 102. Holguras obtenidas en análisis A4-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,002	0,0	-39,7	0,0	0,2
2	1,81	-81,2	0,0	-0,8	81,3
3	1,67	-77,3	0,0	-27,2	67,3
4	1,48	-26,8	-36,2	0,0	48,4
5	1,96	-73,3	0,0	-16,0	96,4
6	1,33	-57,1	0,0	0,0	32,7
7	1,74	-50,5	0,0	-4,6	74,2
8	1,80	-13,1	0,0	-6,7	79,7
9	1,70	-34,5	0,0	-2,9	70,3
10	1,41	-62,6	0,0	0,0	40,6
11	1,79	-77,6	0,0	0,0	78,5
12	2,32	-62,1	-20,8	0,0	132,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,64	-74,4	0,0	0,0	63,6
15	1,43	-69,5	0,0	-28,1	43,3
16	1,54	-66,2	0,0	0,0	54,4
17	1,30	-85,2	0,0	0,0	30,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	2,37	-91,0	0,0	0,0	137,0

Tabla 103. Holguras obtenidas en análisis A5-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
3	2,82	0,0	0,0	0,0	181,6
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,09	0,0	0,0	-13,3	8,7
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,43	-35,1	-33,2	-17,4	42,9
8	1,45	-2,0	0,0	0,0	44,5
9	1,37	0,0	0,0	0,0	37,4
10	1,05	0,0	0,0	0,0	5,1
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,29	0,0	0,0	0,0	29,2
15	1,56	-9,9	0,0	0,0	55,8
16	1,24	-0,9	0,0	0,0	23,8
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,41	-43,4	0,0	0,0	40,7

Tabla 104. Holguras obtenidas en análisis A5-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1,35	-35,3	0,0	-27,0	35,3
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,38	0,0	0,0	-16,6	38,2
6	1,30	-27,1	0,0	0,0	30,4
7	1,51	-57,1	-13,5	-17,4	50,8
8	1,60	0,0	0,0	-16,0	59,7
9	1,63	-6,8	0,0	-2,8	62,8
10	1,25	0,0	0,0	0,0	25,4
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,40	-32,9	0,0	0,0	40,1
15	1,26	-33,8	0,0	-27,9	26,0
16	1,38	0,0	0,0	0,0	37,8
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,71	-41,5	0,0	0,0	70,5

Tabla 105. Holguras obtenidas en análisis A6-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,14	-52,7	0,0	0,0	113,5
3	1,51	-25,4	0,0	0,0	51,2
4	1,07	0,0	-62,3	0,0	6,6
5	1,50	-22,6	0,0	0,0	49,7
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,50	0,0	0,0	0,0	50,1
8	1,17	0,0	0,0	0,0	17,1
9	1,61	0,0	0,0	0,0	61,1
10	1,22	-17,2	0,0	0,0	22,3
11	2,28	-49,1	0,0	0,0	128,5
12	1,54	-26,3	-25,7	0,0	53,8
13	1,05	0,0	-60,9	0,0	5,1
14	1,14	-37,3	0,0	0,0	14,2
15	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,02	-52,9	0,0	0,0	2,3
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,04	-77,3	0,0	0,0	3,7

Tabla 106. Holguras obtenidas en análisis A7-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,57	0,0	0,0	0,0	56,6
3	1,22	0,0	0,0	0,0	22,3
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,45	0,0	0,0	0,0	44,9
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,12	0,0	0,0	0,0	12,3
8	1,44	0,0	0,0	0,0	43,5
9	1,26	0,0	0,0	0,0	25,7
10	1,30	0,0	0,0	0,0	29,7
11	1,66	-74,4	0,0	0,0	66,2
12	1,25	0,0	-48,8	0,0	24,6
13	1,02	0,0	-49,2	0,0	2,3
14	1,40	0,0	0,0	0,0	40,1
15	1,58	0,0	0,0	0,0	58,3
16	1,03	0,0	-33,1	0,0	3,1
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 107. Holguras obtenidas en análisis A6-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1,39	-1,9	0,0	0,0	39,3
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,03	0,0	0,0	-7,9	3,1
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,20	-57,1	-17,2	-17,4	20,4
8	1,02	0,0	0,0	-11,9	2,3
9	1,55	0,0	0,0	0,0	54,8
10	1,01	0,0	0,0	0,0	1,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,46	0,0	-1,4	0,0	46,3
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,02	0,0	0,0	0,0	1,9
15	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 109. Holguras obtenidas en análisis A8-CCR-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,26	0,0	-55,0	-47,8	25,8
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
3	7,65	0,0	-55,8	-31,3	665,5
4	1,38	-37,0	-71,9	0,0	38,3
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,59	0,0	-54,6	-72,5	58,9
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
9	1,19	0,0	0,0	0,0	19,4
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12	2,08	-55,5	0,0	0,0	107,6
13	1,08	-17,4	-39,4	0,0	7,5
14	1,50	0,0	0,0	0,0	49,6
15	2,90	0,0	-0,3	-7,3	190,3
16	1,06	-21,6	0,0	0,0	5,8
17	1,01	-24,0	0,0	0,0	1,4
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	4,67	0,0	0,0	0,0	367,2

Tabla 108. Holguras obtenidas en análisis A7-BCC-Cataluña.

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,57	0,0	0,0	0,0	56,6
3	1,03	0,0	0,0	-20,6	3,2
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,22	0,0	0,0	-21,3	22,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
8	1,26	-23,6	-46,2	0,0	26,5
9	1,19	-34,2	-20,7	0,0	18,7
10	1,30	0,0	0,0	0,0	29,7
11	1,58	-74,2	0,0	-7,4	58,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,31	0,0	0,0	-8,7	31,2
15	1,58	-12,3	0,0	0,0	57,8
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 110. Holguras obtenidas en análisis A8-BCC-Cataluña

DMU	Efic.	Fr	Nr	O	Or
1	1,20	0,0	-52,0	-49,5	20,4
2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
3	6,42	0,0	-44,6	-39,6	542,4
4	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,41	0,0	-46,7	-74,7	41,4
8	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
9	1,18	0,0	0,0	0,0	18,0
10	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
13	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
14	1,36	0,0	0,0	0,0	36,4
15	2,90	0,0	-0,3	-7,3	190,3
16	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
18	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0

## ANEXO 6: Proyecciones y holguras según input y output en Cataluña

Tabla 111. Holguras obtenidas en cada análisis para la capacidad de los camiones de recolección de RSU en Cataluña.

Input	Capacidad de camiones de recolección					
	1		2		3	
Análisis	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-30,0	0,0	-42,4	0,0	-4,6	0,0
3	0,0	0,0	-46,2	-25,9	0,0	0,0
4	-68,6	0,0	-57,3	0,0	-51,1	0,0
5	-10,0	0,0	-32,4	0,0	0,0	0,0
6	-21,7	-16,7	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	-71,4	-72,4	-63,7	-57,5
8	-9,3	-8,6	-35,6	-20,1	-11,0	-11,4
9	0,0	0,0	-23,8	0,0	-23,5	0,0
10	-19,2	0,0	-22,6	0,0	-4,4	0,0
11	-45,7	0,0	-74,6	0,0	-50,7	0,0
12	-59,7	0,0	-68,7	0,0	-40,4	0,0
13	-41,4	0,0	-17,0	0,0	-7,7	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	-33,2	-27,0	-6,4	-7,5
16	-38,8	0,0	-23,5	0,0	0,0	0,0
17	-47,2	0,0	-56,4	0,0	-47,1	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	-49,5	0,0	-65,7	0,0	-27,2	0,0

Tabla 112. Holguras obtenidas en cada análisis para las horas del personal de recolección en Cataluña

Input	Horas del personal de recolección					
	1		2		3	
Análisis	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-49,9	0,0	-55,0	0,0	-23,4	0,0
3	0,0	0,0	-80,2	-48,6	-63,1	-38,4
4	-83,6	0,0	-74,3	0,0	-58,2	0,0
5	-68,4	0,0	-70,8	0,0	-56,8	0,0
6	-49,0	-28,7	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	-21,2	-20,1	0,0	0,0
8	-19,7	-18,5	-27,7	-20,8	0,0	0,0
9	0,0	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0
10	-25,9	0,0	-21,2	0,0	0,0	0,0
11	-28,1	0,0	-48,5	0,0	0,0	0,0
12	-59,7	0,0	-67,9	0,0	0,0	0,0
13	-63,5	0,0	-35,2	0,0	-8,7	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	-28,7	-22,6	0,0	0,0
16	-38,8	0,0	-66,7	0,0	-50,6	0,0
17	-42,9	0,0	-48,7	0,0	-9,6	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	-71,1	0,0	-81,5	0,0	-59,8	0,0

Tabla 113. Holguras obtenidas en cada análisis para la frecuencia de recolección de RSU y RSUR según cada caso, en Cataluña

Input	Frecuencia de recolección de RSU y RSUR															
Análisis	1		2		3		4		5		6		7		8	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-71,7	0,0	-82,3	0,0	-68,5	0,0	-68,5	0,0	-81,2	0,0	-52,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	-73,5	-25,9	-50,7	-14,9	-12,8	0,0	-77,3	-35,3	-25,4	-1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-68,6	0,0	-57,3	0,0	-35,9	0,0	-35,9	0,0	-26,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-37,0	0,0
5	-52,3	0,0	-70,0	0,0	-55,7	0,0	-65,7	0,0	-73,3	0,0	-22,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	-28,7	-16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-57,1	-27,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	-21,2	-33,5	0,0	-38,1	0,0	-35,1	-50,5	-57,1	0,0	-57,1	0,0	0,0	0,0	0,0
8	-9,3	-8,6	-27,7	-20,1	0,0	0,0	-8,1	-2,0	-13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-23,6	0,0	0,0
9	0,0	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	-5,1	0,0	-34,5	-6,8	0,0	0,0	0,0	-34,2	0,0	0,0
10	-45,9	0,0	-30,3	0,0	-18,7	0,0	-31,2	0,0	-62,6	0,0	-17,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	-84,3	0,0	-88,8	0,0	-78,2	0,0	-81,0	0,0	-77,6	0,0	-49,1	0,0	-74,4	-74,2	0,0	0,0
12	-66,0	0,0	-70,5	0,0	-64,9	0,0	-63,4	0,0	-62,1	0,0	-26,3	0,0	0,0	0,0	-55,5	0,0
13	-41,4	0,0	-23,4	0,0	-8,6	0,0	-8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-17,4	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-44,8	0,0	-74,4	-32,9	-37,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	-32,2	-22,6	-4,9	-8,5	-38,4	-9,9	-69,5	-33,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-12,3	0,0
16	-41,7	0,0	-67,8	0,0	-56,2	0,0	-50,0	-0,9	-66,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-21,6	0,0
17	-87,6	0,0	-67,7	0,0	-77,2	0,0	-77,2	0,0	-85,2	0,0	-52,9	0,0	0,0	0,0	-24,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	-85,3	0,0	-93,4	0,0	-85,9	0,0	-85,9	-43,4	-91,0	-41,5	-77,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 114. Holguras obtenidas en cada análisis para la capacidad de contenedores de RSU y RSUR según cada caso, en Cataluña

Input	Capacidad de contenedores de RSU y RSUR															
Análisis	1		2		3		4		5		6		7		8	
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-60,8	0,0	-39,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-55,0	-52,0
2	-30,0	0,0	-42,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	-46,2	-25,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-55,8	-44,6
4	-68,6	0,0	-57,3	0,0	-74,6	0,0	-74,6	0,0	-36,2	0,0	-62,3	0,0	0,0	0,0	-71,9	0,0
5	-10,0	0,0	-32,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	-21,7	-16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	-21,2	-20,1	0,0	0,0	-9,1	-33,2	0,0	-13,5	0,0	-17,2	0,0	0,0	-54,6	-46,7
8	-9,3	-8,6	-27,7	-20,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-46,2	0,0	0,0
9	0,0	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-20,7	0,0	0,0
10	-19,2	0,0	-21,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	-28,1	0,0	-48,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	-59,7	0,0	-67,9	0,0	-63,0	0,0	-64,6	0,0	-20,8	0,0	-25,7	-1,4	-48,8	0,0	0,0	0,0
13	-41,4	0,0	-17,0	0,0	-56,8	0,0	-56,8	0,0	0,0	0,0	-60,9	0,0	-49,2	0,0	-39,4	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	-28,7	-22,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,3
16	-38,8	0,0	-23,5	0,0	-32,3	0,0	-40,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-33,1	0,0	0,0	0,0
17	-42,9	0,0	-48,7	0,0	-45,5	0,0	-45,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	-49,5	0,0	-65,7	0,0	-35,3	0,0	-35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 115. Holguras obtenidas en cada análisis para la cantidad de RSU recolectados, en Cataluña

Input	RSU recolectados												
	3		4		5		6		7		8		
	DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-47,8	-49,5
2	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	-0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	-29,3	-36,8	0,0	0,0	-27,2	-27,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-20,6	-31,3	-39,6
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-26,7	0,0	-2,9	-13,3	-16,0	-16,0	0,0	-7,9	0,0	-21,3	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	-34,3	-34,7	0,0	-17,4	-4,6	-4,6	0,0	-17,4	0,0	0,0	-72,5	-74,7	-74,7
8	-16,1	-17,1	0,0	0,0	-6,7	-6,7	0,0	-11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	-28,8	0,0	0,0	0,0	-2,9	-2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	-13,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-7,4	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-8,7	0,0	0,0	0,0
15	-22,0	-23,4	0,0	0,0	-28,1	-28,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-7,3	-7,3	-7,3
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 116. Holguras obtenidas para los diferentes outputs de cada análisis, en Cataluña

Análisis	8															
	1		2		3		4		5		6		7		8	
	Output	RSU	RSU	RSUR	RSUR	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.	Or.
DMU	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC	CCR	BCC
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,8	20,4
2	0,0	0,0	0,0	0,0	73,0	0,0	73,0	0,0	81,3	0,0	113,5	0,0	56,6	56,6	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	86,0	62,5	205,5	181,6	67,3	35,3	51,2	39,3	22,3	3,2	665,5	542,4
4	0,0	0,0	0,0	0,0	17,8	0,0	17,8	0,0	48,4	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	38,3	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	47,9	0,0	53,1	8,7	96,4	38,2	49,7	3,1	44,9	22,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,7	30,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	26,9	17,9	91,5	42,9	74,2	50,8	50,1	20,4	12,3	0,0	58,9	41,4
8	0,0	0,0	0,0	0,0	38,3	37,5	45,5	44,5	79,7	59,7	17,1	2,3	43,5	26,5	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	39,3	37,4	70,3	62,8	61,1	54,8	25,7	18,7	19,4	18,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	0,0	45,8	5,1	40,6	25,4	22,3	1,0	29,7	29,7	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	94,3	0,0	101,8	0,0	78,5	0,0	128,5	0,0	66,2	58,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	103,7	0,0	109,5	0,0	132,0	0,0	53,8	46,3	24,6	0,0	107,6	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	2,3	0,0	7,5	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,0	29,2	63,6	40,1	14,2	1,9	40,1	31,2	49,6	36,4
15	0,0	0,0	0,0	0,0	40,2	39,7	63,5	55,8	43,3	26,0	0,0	0,0	58,3	57,8	190,3	190,3
16	0,0	0,0	0,0	0,0	23,4	0,0	34,9	23,8	54,4	37,8	0,0	0,0	3,1	0,0	5,8	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	40,8	0,0	40,8	0,0	30,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	109,5	0,0	109,5	40,7	137,0	70,5	3,7	0,0	0,0	0,0	367,2	0,0