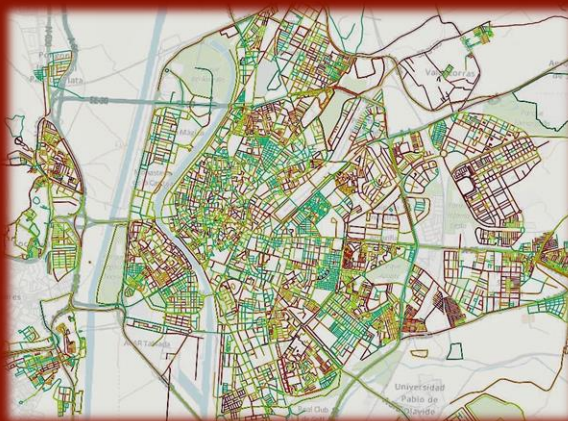


Tesis Doctoral

Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial

Desarrollo y aplicación de una metodología GPI. Caso de estudio en una empresa de aguas



Autor: Cristóbal Ramos Salgado

**Directores: Luis Onieva Giménez
Jesús Muñuzuri Sanz**

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

2022



Tesis Doctoral

Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial

Desarrollo y aplicación de una metodología GPI. Caso de estudio en una empresa de aguas

Autor: Cristóbal Ramos Salgado

Directores: Luis Onieva Giménez y Jesús Muñuzuri Sanz

Catedráticos de Universidad

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Tesis doctoral: Desarrollo y aplicación de una metodología GPI. Caso de estudio en una empresa de aguas

Autor: Cristóbal Ramos Salgados

Directores: Luis Onieva Giménez

Jesús Muñuzuri Sanz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia, por su apoyo incondicional y transmitirme siempre positividad y entusiasmo.

A mis tutores y compañeros de trabajo, por ayudarme a crecer, aprender y disfrutar cada día.

Gracias.

Resumen

Las redes de abastecimiento de agua y saneamiento son infraestructuras críticas que prestan un servicio básico a la sociedad. Estos sistemas, que por tanto deben funcionar correctamente durante su vida útil, muestran un inevitable envejecimiento y degradación, lo que conduce a ineficiencias e impactos en el servicio.

Así, una adecuada estrategia de mantenimiento y renovación que garantice la futura sostenibilidad técnica, social, económica y ambiental de estos sistemas se presenta como el reto que las empresas de agua y los municipios deben afrontar en el siglo XXI.

Aquí entra en juego la gestión patrimonial de infraestructuras (GPI), que aborda la correcta estimación y planificación de las inversiones necesarias para garantizar su sostenibilidad económica, técnica, social y medioambiental para las futuras generaciones.

En particular, esta tesis tiene como objetivo el desarrollo de una metodología GPI eficaz en redes de abastecimiento y saneamiento de aguas, mediante una estimación adecuada del estado general de la red, la programación eficiente de las actividades de renovación y la planificación justificada de las necesidades de inversión que garanticen su sostenibilidad a largo plazo.

Las principales propuestas de esta metodología pasan por el desarrollo de un novedoso índice de riesgo para establecer una prioridad de intervención en cada

elemento de la red. Para ello se ha empleado un modelo de sumas ponderadas y tenido en cuenta cinco factores asociados al estado de la tubería y a las consecuencias de un posible fallo.

También se ha propuesto la utilización de elementos urbanos frente a los hidráulicos como unidades operacionales de intervención, lo que aporta un enfoque más práctico y la posibilidad de cohesionarse mejor con otros posibles proyectos urbanos de mantenimiento (gas, luz o pavimento).

Por otro lado, resulta esencial alinear los planes de acción de renovación de la red con las estrategias reales de sustitución de las empresas de agua. En este sentido, se han integrado criterios operativos de adyacencia y conveniencia de la reposición simultánea, no abordados hasta ahora, junto con otros de distribución presupuestaria entre tipo de red y poblaciones, dotando a la metodología de un enfoque realista e innovador

Finalmente, el estado de la red y el efecto de los planes de renovación se miden y controlan mediante cuatro indicadores eficaces e inequívocos que ofrecen información completa y diversa sobre el rendimiento de la red.

Abstract

Water supply and sewer networks are critical infrastructures that provide a basic service to society. These systems, which must therefore operate correctly during their useful life, show an inevitable aging and degradation, leading to inefficiencies and impacts on the service.

Thus, an adequate maintenance and renewal strategy that guarantees the future technical, social, economic and environmental sustainability of these systems is presented as the challenge that water companies and municipalities must face in the 21st century.

This is where infrastructure asset management (IAM) comes into play, which addresses the correct estimation and planning of the necessary investments to guarantee their economic, technical, social and environmental sustainability for future generations.

In particular, this thesis aims to develop an effective IAM methodology for water supply and sanitation networks, through an adequate estimation of the general condition of the network, the efficient scheduling of renewal activities and the justified planning of investment needs to ensure its long-term sustainability.

The main proposals of this methodology include the development of a novel risk index to establish a priority for intervention in each element of the network. For this purpose, a weighted sum model has been used and five factors associated with the

condition of the pipeline and the consequences of a possible failure have been taken into account.

Also, urban elements rather than hydraulic elements haven been considered as operational units of replacement, which provides a more practical approach and the possibility of better coordination with other possible urban maintenance projects.

On the other hand, it is essential to align the network renewal action plans with the actual replacement strategies of the water companies. In this sense, operational criteria of adjacency and synergy of simultaneous replacement, not addressed so far, have been integrated with other criteria of budget distribution between type of network and population, giving the methodology a realistic and innovative approach.

Finally, the condition of the network and the effect of the renewal plans are measured and monitored by means of four effective and unambiguous indicators that provide complete and diverse information on network performance.

ÍNDICE

Resumen.....	i
Abstract.....	iii
ÍNDICE	v
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	xiii
1. Introducción.....	1
1.1. <i>La GPI en España</i>	3
1.2. <i>La GPI en el mundo</i>	8
1.3. <i>Estructura del documento</i>	11
2. Revisión de la literatura y propuesta de actuación.....	13
2.1. <i>Metodologías basadas en la gestión de costes</i>	15
2.1.1. Notación.....	18
2.1.2. Análisis comparativo y aplicabilidad	19
2.2. <i>Metodologías basadas en el seguimiento de indicadores</i>	22
2.2.1. Utilidad y aplicación de las técnicas multicriterio para la priorización de tareas de reemplazo.....	23
2.2.2. Técnicas multicriterio para la evaluación de importancia de los factores de decisión	27
2.2.2.1. Proceso de jerarquía analítica (AHP)	27
2.2.2.2. Elección discreta (ED)	31
2.2.2.3. Ajuste por regresión lineal múltiple (RLM).....	32

2.2.3.	Técnicas multicriterio la priorización de alternativas de inversión...	33
2.2.3.1.	Metodología basada en la matriz de riesgos.....	33
2.2.3.2.	Metodología basada en la puntuación de alternativas: método de sumas ponderadas (MSP).....	35
2.2.3.3.	Metodologías <i>outranking</i> : ELECTRE y PROMETHEE.....	37
2.2.3.4.	Resumen.....	38
2.2.3.5.	Aplicabilidad.....	42
2.2.4.	Indicadores	44
2.2.4.1.	Resumen.....	53
2.3.	<i>Metodologías de agrupación</i>	55
2.4.	<i>Ejemplos de aplicación de metodologías GPI en empresas del sector</i>	61
2.5.	<i>Conclusiones extraídas de la revisión de la literatura</i>	64
2.6.	<i>Propuesta de actuación</i>	68
3.	Prioridad de reemplazo: desarrollo del Índice de Riesgo.....	73
3.1.	<i>Factores asociados al estado de la tubería</i>	77
3.2.	<i>Factores asociados a las consecuencias del fallo</i>	78
3.3.	<i>Planteamiento del cálculo de ponderaciones</i>	80
3.3.1.	Diseño de cuestionarios	81
3.3.2.	Cumplimentación de cuestionarios	83
3.3.3.	Variables de codificación	86
3.4.	<i>Obtención de ponderaciones</i>	88
3.4.1.	Todas las variables y todos los encuestados	89
3.4.1.1.	Cuestionario de selección.....	89
3.4.1.2.	Cuestionario de valoración numérica.	94

3.4.2.	Conjunto reducido de variables y todos los encuestados.....	97
3.4.2.1.	Cuestionario de selección.....	98
3.4.2.2.	Cuestionario de valoración numérica.....	100
3.4.2.3.	Análisis de correlaciones.....	101
3.4.3.	Conjunto reducido de variables para la División de Ingeniería.....	106
3.4.3.1.	Cuestionarios de selección.....	107
3.4.3.2.	Cuestionario de valoración numérica.....	108
3.4.3.3.	Análisis de correlaciones.....	110
3.4.4.	Conjunto reducido de variables para los Departamentos de Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.....	115
3.4.4.1.	Cuestionarios de selección.....	116
3.4.4.2.	Cuestionario de valoración numérica.....	117
3.4.4.3.	Análisis de correlaciones.....	120
3.4.5.	Ajuste no lineal.....	124
3.4.5.1.	Función basada en logaritmos.....	124
3.4.5.2.	Función basada en raíz cuadrada y cúbica.....	126
3.4.5.3.	Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponencial.....	128
4.	Conclusiones.....	131
4.1.	<i>Resultados y discusión.....</i>	132
4.2.	<i>Listado de contribuciones.....</i>	135
4.3.	<i>Futuras líneas de investigación.....</i>	139
5.	Referencias.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Notación empleada en los modelos de análisis de costes del ciclo de vida.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2: Clasificación de los modelos revisados según los parámetros de entrada que requieren</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3: Clasificación de los modelos propuestos en cada artículo según los parámetros de salida que proporcionan</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4: Análisis de las ventajas e inconvenientes y evaluación de las metodologías basadas en la gestión de costes.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5: Trabajos desarrollados sobre técnicas MCD según aplicación entre 1980 y 2012 (Kabir et al., 2014).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6: Artículos desarrollados sobre técnicas MCD según método entre 1980 y 2012 (Kabir et al., 2014).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7: Distribución de artículos sobre métodos multicriterio según área de aplicación (Kabir et al., 2014).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 8: Distribución de los métodos MCD en función de la región (Kabir et al., 2014)</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 9: Pesos de importancia de los factores que influyen en la decisión de rehabilitar una válvula (Marlow et al., 2012).....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 10: Factores para determinar el estado de la tubería, con sus pesos de importancia, recogidos de la literatura</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 11: Clasificación de los factores empleados en la literatura en función de la metodología empleada.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 12: Valores de referencia para los indicadores (Alegre et al., 2013; Alegre y Coelho, 2013).....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 13: Valores de referencia para los indicadores (Marques et al., 2012).....</i>	<i>49</i>

<i>Tabla 14: Valores de referencia para los indicadores (Ferreira y Carriço, 2017)</i>	51
<i>Tabla 15: Clasificación de los indicadores de evaluación del estado de la red según frecuencia de aparición en la literatura</i>	55
<i>Tabla 16: Comparación de las principales metodologías GPI identificadas</i>	63
<i>Tabla 17: Factores de influencia según tipología y tratamiento</i>	80
<i>Tabla 18: Relación del personal que cumplimentó los cuestionarios</i>	83
<i>Tabla 19: Listado de variables que intervienen en la función del Índice de Riesgo</i>	87
<i>Tabla 20: Cuestionarios de selección. Conjunto total de variables y encuestados</i>	90
<i>Tabla 21: Cuestionarios de valoración numérica. Conjunto total de variables y encuestados</i>	94
<i>Tabla 22: Cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados</i>	98
<i>Tabla 23: Cuestionarios de valoración numérica. Todos los encuestados</i>	100
<i>Tabla 24: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería</i>	107
<i>Tabla 25: Resultados de los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería</i>	109
<i>Tabla 26: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos</i>	116
<i>Tabla 27: Resultados de los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos</i>	118
<i>Tabla 28: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en logaritmos</i>	125
<i>Tabla 29: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para</i>	

<i>todos los encuestados. Función basada en raíces</i>	127
<i>Tabla 30: Características del ajuste del IR según combinación de raíces, logaritmos y exponenciales</i>	129
<i>Tabla 31: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponenciales.</i>	129

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Caracterización de las redes hidráulicas españolas según su edad (García et al., 2019).....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2: Sistema de redes de EMASESA en la ciudad de Sevilla;Error! Marcador no definido.</i>	
<i>Figura 3: Curvas de costes de reparación, inversiones y costes totales y tiempo óptimo de reemplazo</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4: Aplicación de técnicas multicriterio en diversos tipos de infraestructuras (Kabir et al. 2014).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5: Análisis de riesgo equilibrado entre probabilidad y consecuencias de fallo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6: Análisis de riesgo centrado en la probabilidad de fallo.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7: Análisis de riesgo centrado en la probabilidad de fallo.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 8: Principales enfoques adoptados por empresas que gestionan infraestructuras</i>	<i>45</i>
<i>Figura 9: Principales métricas elegidas por las empresas de abastecimiento (Cardoso et al., 2016b).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 10: Principales métricas elegidas por las empresas de saneamiento y aguas pluviales (Cardoso et al., 2016b).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 11: Estrategias de reemplazo y metodologías de agrupación.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 12: Metodología propuesta de gestión patrimonial de infraestructuras (GPI).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 13: Combinación del estado de una tubería con las consecuencias derivadas de su fallo para determinar la priorización de reemplazos.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 14: Estructura de la información para cada tramo de red en los cuestionarios.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 15: Ejemplo de cuestionario de selección (elección discreta).</i>	<i>82</i>
<i>Figura 16: Ejemplo de cuestionario de valoración numérica (regresión lineal multivariable).</i>	

.....	82
<i>Figura 17: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto total de variables y encuestados.</i>	93
<i>Figura 18: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto total de variables y para todos los encuestados.</i>	96
<i>Figura 19: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	99
<i>Figura 20: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	101
<i>Figura 21: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	102
<i>Figura 22: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la demanda no servida en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados</i>	103
<i>Figura 23: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de aguas pluviales que circula por un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	104
<i>Figura 24: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado a un tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	105
<i>Figura 25: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter sensible de un tramo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.</i>	106
<i>Figura 26: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	108
<i>Figura 27: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	110
<i>Figura 28: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la</i>	

<i>probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	111
<i>Figura 29: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la demanda no servida en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	112
<i>Figura 30: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de aguas pluviales que circula por un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	113
<i>Figura 31: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado a un tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	114
<i>Figura 32: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter de “sensible” de un tramo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.</i>	115
<i>Figura 33: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.</i>	117
<i>Figura 34: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.</i>	119
<i>Figura 35: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. de Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.</i>	120
<i>Figura 36: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal no servido en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.</i>	121
<i>Figura 37: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de pluviales en un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y</i>	

<i>Calidad Aguas y Modelos</i>	122
<i>Figura 38: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado al tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos</i>	123
<i>Figura 39: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter de “sensible” de un tramo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos</i>	124
<i>Figura 40: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en logaritmos</i>	126
<i>Figura 41: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables para todos los encuestados. Func. basada en raíces</i>	128
<i>Figura 42: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponenciales</i>	130

1. INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras hidráulicas, y en particular las redes de abastecimiento y saneamiento de aguas, son sistemas críticos que prestan un servicio público básico, por lo que deben funcionar correctamente durante su vida útil. Sin embargo, la inversión pública destinada a tareas de gestión y mantenimiento de estas infraestructuras suele ser insuficiente o ineficiente.

Las redes urbanas de abastecimiento y saneamiento de aguas son, además, sistemas extensos y complejos. Según el INE, el sistema hidráulico español consta actualmente con más de 256.000 km de redes de abastecimiento y 144.000 km de saneamiento, acumulando un valor patrimonial de 150.000 millones de euros.

Por otro lado, estas infraestructuras envejecen y se degradan, derivando en ineficiencias hidráulicas y energéticas, así como problemas de insalubridad. Este constante envejecimiento puede observarse en la Figura 1, que compara el porcentaje de red hidráulica comprendida en un cierto rango de edad entre los años 2007 y 2016.

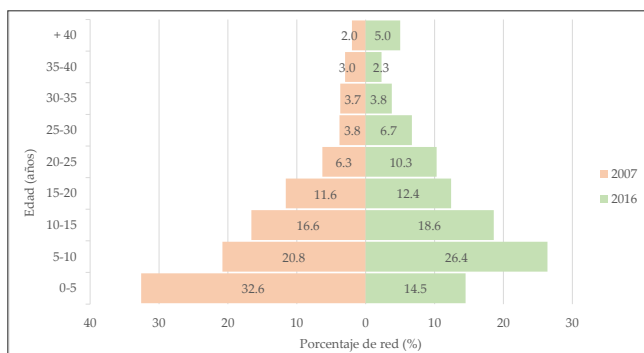


Figura 1: Caracterización de las redes hidráulicas españolas según su edad (García *et al.*, 2019)

Así, una adecuada estrategia de gestión que asegure la futura sostenibilidad técnica, social, económica y medioambiental de estas infraestructuras es un reto que les toca afrontar tanto a las compañías de agua como a los organismos públicos.

Es decir, este constante proyecto de mantenimiento y renovación debe llevarse a cabo de la forma más eficiente posible. Cada actividad de mantenimiento supone un importante esfuerzo económico. Según la *American Water Works Association* (AWWA), "las necesidades de inversión en infraestructuras de agua potable en EE.UU. superarían el billón de dólares entre 2010 y 2035" (Shanaghan, 2012). Por tanto, la elección del elemento de la red y el momento adecuado para su sustitución son cruciales.

Con todo esto, la misión de las empresas gestoras en este siglo XXI es definir y planificar estrategias de renovación e inversión lo más eficientemente posible para mantener, si no mejorar, el rendimiento de estos sistemas, controlando al mismo tiempo unos recursos económicos limitados.

Y es aquí donde entra en juego la gestión patrimonial de infraestructuras (GPI). La GPI se define como la metodología de planificación estratégica que persigue definir las líneas fundamentales de gestión de la empresa y concretar la planificación de las inversiones necesarias, para asegurar el cumplimiento de los objetivos de servicio prefijados a lo largo del tiempo, optimizando la utilización de los recursos presentes y futuros disponibles de forma que pueda garantizar su sostenibilidad económica, técnica, social y medioambiental.

Alegre y Coelho (2013) proporcionan una definición más específica de las metodologías GPI aplicadas las redes urbanas de agua, siendo aquellas que "buscan que el rendimiento de las infraestructuras cumpla los objetivos de servicio, que los riesgos se gestionen adecuadamente y que los costes se reduzcan al máximo a lo largo del tiempo".

Así, el principal objetivo de una eficiente gestión patrimonial de un sistema de redes de abastecimiento y saneamiento es la correcta estimación y planificación a largo plazo de las inversiones necesarias para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Para ello, es esencial disponer de información precisa sobre el estado de la red, su rendimiento deseado, los riesgos, costes aplicables y las relaciones entre estos. Un tratamiento eficaz de esta información ayuda a determinar el momento óptimo de reemplazo de un activo, en este caso un tramo de red, conocida su condición, edad, importancia, etc.

En este sentido, existe una serie de normas referentes a la GPI y aplicables a un sistema de redes de agua. Estas son:

- *UNE ISO 55001-2014*, que trata sobre la gestión de activos de modo general.
- *ISO 24516-1:2016*, que se centra en la gestión de activos de redes de aguas.
- *UNE ISO 31000: 2010*, sobre la organización de procesos en la gestión del riesgo.

Asimismo, varios países europeos han desarrollado diversas guías de gestión de infraestructuras de agua para ayudar en el proceso de toma de decisiones para la rehabilitación y renovación de estos sistemas.

A continuación, se analizan las actuales estrategias de renovación que han diseñado algunas empresas del sector en España y se expone una recopilación de guías y otras referencias por las que se rigen otros países para llevar a cabo una eficiente gestión patrimonial de sus infraestructuras urbanas.

1.1. La GPI en España

En España, la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) tiene un grupo de trabajo para promover y mantener un sistema de gestión patrimonial de infraestructuras. De acuerdo con los datos del XIV Estudio de

Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España 2016 de la AEAS, España cuenta con un total de 224.000 km de red, lo que supone 4.8 metros de tubería por persona.

Mantener y renovar las infraestructuras hídricas urbanas en España, que en su mayoría fueron construidas a lo largo del siglo XX, es uno de los grandes retos a afrontar por los que gestionan estos sistemas. Tanto que, como ocurre en otros países, los sistemas hídricos urbanos de una cierta entidad deberían tener perfilado un plan de GPI. A continuación, se exponen las actuales estrategias de renovación que han diseñado algunas empresas del sector como EMASESA, Aguas de Valencia o el Canal de Isabel II.

Global Omnium. Aguas de Valencia

Empresa especializada en la gestión integral del agua, ofrece servicio a casi 6 millones de personas en más de 300 ciudades de España. Se cifran en 19.000 kilómetros las infraestructuras hidráulicas de agua potable gestionadas por Global Omnium y en 380.000 los puntos de toma por los que se distribuye el agua potable a los clientes del servicio.

Global Omnium también implanta una metodología de GPI siguiendo un modelo cuyas características, retos, dificultades y resultados obtenidos son descritos en Ponz Carcelén y Salguero Barceló (2017). Los principales aspectos de esta metodología son:

Objetivos. Planificación estratégica, táctica y operacional

Este modelo GPI consiste en realizar una separación de los objetivos de nivel estratégico, táctico y operativo, respectivamente, y cada uno de ellos con un alcance y ámbito temporal diferente. A nivel estratégico, se analiza todo el sistema hidráulico con un horizonte temporal superior a 10 años. A nivel táctico, el estudio se centra en cada una de las zonas o sectores que forman el sistema hidráulico, con un horizonte temporal entre 3 y 5 años. Por último, el nivel con un mayor grado de detalle es el

operativo, que analiza todos los activos del sistema, con un horizonte temporal anual.

Para cada uno de estos niveles Global Omnium establece una serie de objetivos, estando todos ellos alineados con la misión y visión de la empresa. Además, para evaluar cuantitativamente estos criterios se establecen métricas de evaluación o indicadores de gestión los cuales servirán para medir el desempeño la actividad. Uno de los indicadores considerados por Global Omnium, al igual que EMASESA, es el IVI, desarrollado por Alegre *et al.* (2014).

Diagnóstico de la prestación del servicio

Tras establecer los objetivos y cómo se evalúan, es necesario conocer con exactitud el punto de partida, es decir, la situación actual que presenta el sistema hidráulico, para determinar los esfuerzos necesarios para alcanzar los objetivos y metas propuestos, y prever las alternativas o caminos para alcanzarlos.

Para ello, Global Omnium realiza un análisis DAFO, que es una metodología de estudio de su situación interna (debilidades y fortalezas) y externa (amenazas y oportunidades). El principal objetivo del análisis DAFO aplicado a la GPI es identificar posibles escenarios futuros, así como diferentes estrategias de actuación.

Planificación de inversiones

El siguiente paso consiste en plantear una serie de alternativas de actuación para lograr los objetivos marcados. Se obtiene la evaluación promedio de los indicadores de desempeño para cada alternativa de actuación, siendo la actuación con mayor puntuación la más adecuada para la consecución de los objetivos marcados y como resultado final se obtiene una priorización de las actuaciones a acometer.

Monitorización del plan GPI

La monitorización de la gestión patrimonial de infraestructuras es un proceso continuo por el cual se compara la situación alcanzada en cada momento con la planificación propuesta. En el caso de existir desviaciones importantes entre la planificación y lo realmente alcanzado, se revisan las planificaciones para intentar adaptarse al nuevo escenario.

Dificultades en la implantación del plan GPI

Global Omnium también comparte las dificultades que han tenido que afrontar en la implantación de la gestión patrimonial de infraestructuras:

- Falta o deficiencias en la información. Es muy frecuente desconocer, por ejemplo, el histórico de roturas de un elemento en concreto o la fecha de instalación de los activos, lo cual conlleva serias dificultades a la hora de calcular el Índice de Valor de Infraestructuras.
- Dificultad en la definición de los indicadores de gestión y su importancia. Uno de los procesos más importantes en la GPI consiste en establecer tanto los indicadores de gestión como sus pesos, debido a la subjetividad que ello supone.

ALJARAFESA. Aljarafe (Sevilla)

Es la empresa pública de agua de la zona del Aljarafe, Sevilla, que da cobertura actualmente a más de 300.000 habitantes. Dentro de su nuevo plan de sistemas en desarrollo, Aljarafesa está inmerso en un proceso de renovación de sus herramientas tecnológicas (GIS, software de modelización, etc.), así como de su información cartográfica y de redes. Mediante SCADA, gestionan sus activos y monitorizan los parámetros de explotación para acometer actuaciones de renovación de infraestructuras o de ampliación y mejora.

Actualmente, Aljarafesa tiene implantado un sistema para gestionar el ciclo de vida de sus activos ETAP, EDARs, EBARs, redes de abastecimiento y saneamiento y formular sus planes de inversiones.

Udal Sareak. Consorcio de Aguas de Bilbao-Bizkaia

Udal Sareak gestiona 64 municipios, 300.000 habitantes y 2.500 km de redes. Para la gestión de activos, esta empresa utiliza las herramientas software GIS, EPANET y AWARE-P, con los que priorizan las inversiones.

Para establecer la priorización de las tuberías a la hora de distribuir el presupuesto asignado, se definen cuatro criterios: tuberías de fibrocemento (20%), longevidad de las tuberías (50%), probabilidad de fallo de cada tubería (10%) e importancia de cada tubería (20%). Finalmente se obtiene, tras el cálculo del IVI, entre otros, una relación entre el IVI deseado y el presupuesto necesario.

FACSA. Castellón

FACSA es la empresa de suministro de agua y aguas residuales de Castellón y atiende a 69 municipios y una población combinada de 870.000 habitantes. AWARE-P es el software que respalda el desarrollo de los planes de gestión de activos de infraestructura estratégica y táctica de FACSA, en un proyecto que se beneficia del apoyo principal del grupo de gestión de aguas urbanas de la Universidad Politécnica de Valencia (baseform.org).

Canal de Isabel II. Madrid

El Canal Isabel II ha creado un modelo de riesgo en el que se tienen en cuenta diversos factores Sánchez y Casquero (2015), que ha sido empleado para estimar el riesgo en su red de abastecimiento. Para la visualización de los resultados, emplean un sistema GIS.

1.2. La GPI en el mundo

En este apartado se comentan brevemente las guías y referencias en GPI empleadas en Europa y otros países a nivel mundial.

Alemania y Austria

A nivel europeo, Alemania y Austria utilizan las guías de las asociaciones alemanas y austriacas del gas y agua (DVGW —<https://www.dvgw.de/>— y ÖVGW —<https://www.ovgw.at/>—) de apoyo a las decisiones para la rehabilitación de los sistemas de distribución de agua (*Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserverteilungsanlagen*) y Redes de distribución de agua – operación y mantenimiento (*Wasserverteilungen – Betrieb und Instandhaltung*), respectivamente.

Francia

En Francia, la Oficina Nacional de Agua y Ambientes Acuáticos (*Office national de l'eau et des milieux aquatiques*, ONEMA —<http://www.onema.fr/>—) lanza la guía Gestión patrimonial de las redes de agua potable (*Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable*), mientras que el Reino Unido utiliza la guía Planificación y gestión de activos (*Asset Management Planning*) de la asociación Investigación de la Industria del Agua del Reino Unido (*United Kingdom Water Industry Research*, UKWIR - <https://www.ukwir.org/>).

Portugal

En Portugal, existen la Entidad Reguladora de los Servicios de Aguas y Residuos (*Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos*, ERSAR - <http://www.ersar.pt/pt>) y el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, LNEC —<http://www.lnec.pt/hidraulica-ambiente/pt/>—). Ambas entidades, junto con Instituto Superior Técnico (IST), colaboraron en el desarrollo de la guía Gestión patrimonial de las infraestructuras de abastecimiento de agua - Un enfoque centrado

en la rehabilitación (*Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água - Uma abordagem centrada na reabilitação*), cuyos autores son Helena Alegre y Didia Covas. Esta guía está enmarcada en el ámbito del proyecto AWARE-P tiene como objetivo orientar a las entidades gestoras de sistemas de abastecimiento de agua que decidan poner en práctica una estrategia proactiva de gestión patrimonial de infraestructuras, para la cual la rehabilitación asume un papel central.

La importancia de la gestión patrimonial de las infraestructuras en Portugal está incluso reconocida en la reciente legislación del sector, en particular en el Decreto-Ley nº 194/2009, del 20 de agosto, que determina que las entidades gestoras que sirvan a más de 30.000 habitantes deben promover y mantener un sistema de gestión patrimonial de infraestructuras y disponer de información sobre la situación de las infraestructuras, su caracterización y la evaluación de su estado funcional y de conservación.

Estados Unidos de América

A nivel internacional, Estados Unidos emplea publicaciones del Instituto de Gestión de Activos (*Institute of Asset Management, IAM* —<https://theiam.org/>—), como el documento Gestión de activos – una anatomía (*Asset Management – An Anatomy*), y de la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency, EPA* —<https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/asset-management-water-and-wastewater-utilities>—), como la guía Tecnologías de evaluación de condiciones para sistemas de transmisión y distribución de agua (*Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems*). Esta última recopila un inventario exhaustivo de las tecnologías de evaluación de la condición y los sistemas de apoyo a las decisiones que se aplican a las redes de distribución de agua e identifica las brechas que la comunidad de investigación y desarrollo debe abordar.

Australia

Australia emplea las Pautas para los sistemas de gestión del agua potable, desarrollada por el estado de Nueva Gales del Sur (NSW) (*NSW Guidelines for Drinking Water Management Systems* —<http://www.water.nsw.gov.au/>—). Ésta brinda una orientación sobre el desarrollo y la implementación de un sistema de gestión del agua potable para los proveedores de agua en Nueva Gales del Sur, incluidas las empresas locales de suministro de agua y los proveedores privados más grandes. En ella se hace referencia a la Guía australiana para el agua potable (*Australian Drinking Water Guidelines, ADWG*), que pretende proporcionar un marco para una buena gestión del suministro de agua potable que dé una referencia autorizada para definir el agua segura y de buena calidad.

Por otro lado, en las dos últimas décadas se han desarrollado en todo el mundo varias metodologías de ayuda a la decisión y herramientas de software para facilitar a las empresas de agua una gestión adecuada de sus infraestructuras. Algunas de ellas son KANEW (Deb y Herz, 1988), AQUA-WertMin (Pérez y Perdomo, 2011), UtilNets, PRISM, PARMS-PLANNING (Wiser Analysis, 2016), CARE-W y CARE-S (Saegrov, 2006), PARMS-PRIORITY (Moglia *et al.*, 2005), HYDROPLAN (De Gueldre *et al.*, 2007) y AWARE-P (Alegre *et al.*, 2013).

Una descripción de estas herramientas, incluyendo información sobre la metodología implementada, los datos de entrada e información de salida que ofrece, junto con algunas experiencias reales, se recogen en el Anexo A de este documento.

Con todo lo anterior, el objetivo último de esta tesis es el desarrollo de una metodología eficaz de gestión patrimonial de infraestructuras (GPI) en redes de abastecimiento y saneamiento de aguas, mediante una estimación adecuada del estado general de la red, la programación eficiente de las actividades de renovación y la planificación justificada de las necesidades de inversión que garanticen su sostenibilidad a largo plazo. Además, junto con este objetivo, también se persigue alinear los planes de acción con las estrategias reales de sustitución de las empresas

de agua, integrando criterios operativos y de conveniencia y que no se han abordado hasta ahora, dotando a la metodología de un enfoque práctico e innovador.

1.3. Estructura del documento

La estructura que presenta el resto del documento es la siguiente. El capítulo 2 recoge una revisión exhaustiva de la literatura sobre las metodologías GPI existentes. Ésta se ha dividido en los trabajos que definen las necesidades y tiempos ideales de reemplazo de los elementos de la red en función de criterios puramente económicos y aquellos que presentan un enfoque más basado en la sostenibilidad de la infraestructura.

El capítulo 3 describe el desarrollo de un índice de prioridad para el reemplazo de tuberías, integrando simultáneamente factores relacionados tanto con la probabilidad como consecuencia de un fallo en la red.

El capítulo 4 expone las conclusiones de este trabajo abordando los resultados principales, las contribuciones derivadas en forma de publicaciones científicas y las posibles futuras líneas de investigación que pueden ser de interés.

Por último, en el capítulo 5 se muestra la lista de referencias consultadas.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y PROPUESTA DE ACTUACIÓN

Este capítulo recoge el ejercicio de revisión de la literatura llevado a cabo. En total se han revisado más de 300 trabajos, que han aportado una clara visión de las metodologías GPI existentes.

La primera idea extraída de la literatura es que puede realizarse una distinción general entre dos enfoques de metodologías GPI. La primera categoría recoge las metodologías basadas en la gestión de costes. Estos métodos tienen como objeto determinar el tiempo óptimo de reemplazo para una tubería en función de sus costes de mantenimiento y reemplazo previstos.

Algunos trabajos en este campo utilizan modelos de simulación (Rasoulkhani *et al.*, 2019) o algoritmos heurísticos (Abu Samra *et al.*, 2018) para programar de forma óptima la sustitución de las tuberías. No obstante, estos modelos suelen presentar un enfoque demasiado matemático, muy centrado en una tubería aislada y perdiendo perspectiva del conjunto global de la red. El apartado 2.1 de este capítulo aborda este enfoque, clasificando y examinando los trabajos encontrados.

El segundo grupo de metodologías permite obtener un enfoque más centrado en la sostenibilidad de la red, y engloba dos subprocesos. El primero consiste en definir una prioridad de sustitución para cada objeto de tubería, identificando los activos de la red que deben ser intervenidos en primer lugar

En este sentido, las técnicas de *machine learning* como la regresión logística (Jara-Arriagada y Stoianov, 2021; Robles-Velasco *et al.*, 2020) o el clustering (Chen y Guikema, 2020; Wang y Li, 2020) se están haciendo populares para predecir los fallos

de las tuberías en las redes de agua. Además, para abordar la evaluación del riesgo de las tuberías, es necesario incorporar criterios relacionados con las consecuencias del fallo. En este sentido, la técnica de la matriz de riesgo ha sido ampliamente utilizada para identificar tuberías críticas en redes de abastecimiento de agua (Baah *et al.*, 2015; D'Ercole *et al.*, 2018). Otros trabajos, en cambio, desarrollan y asignan a cada tubería un Índice de Riesgo, que equivale a una prioridad de sustitución. Para ello, se ha utilizado el popular modelo de suma ponderada Kiliñç *et al.* (2018) y los métodos basados en lógica difusa (Phan *et al.*, 2019; Salehi *et al.*, 2020).

El segundo de los pasos es la definición y seguimiento de indicadores (KPIs) que evalúen el estado de la red. Estos indicadores deben permitir definir planes concretos de mantenimiento sobre los activos de la red y establecer valores objetivo que se traduzcan en garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Los trabajos encontrados bajo este enfoque se analizan en el apartado 2.2.

Otra vertiente de interés a analizar en la literatura trata las metodologías de agrupación de elementos hidráulicos que, en base a criterios de adyacencia y sinergia, aprovechan la reposición simultánea de distintos elementos de la red para acometer tareas de renovación desde un punto de vista más práctico y económico. Esto se aborda en el apartado 2.3.

Además, como se ha indicado en el capítulo anterior, este trabajo de investigación está orientado a la futura aplicación real de una metodología GPI a una empresa de aguas, por lo que también es objeto de este amplio y riguroso trabajo el estudio de la viabilidad y conveniencia de aplicación de las distintas metodologías a dicha empresa. Este análisis se lleva al final de cada subapartado de este capítulo. También con esta intención, el apartado 2.4 recoge algunos ejemplos reales de aplicación de metodologías GPI a empresas del sector que pueden ser de utilidad.

Finalmente, los apartados 2.5 y 2.6 resumen las principales conclusiones extraídas de esta revisión de la literatura, las carencias detectadas y la propuesta de actuación para superarlas.

2.1. Metodologías basadas en la gestión de costes

Dentro de este primer enfoque, pueden identificarse, a su vez, otros dos tipos de modelos según su función objetivo. Por un lado, (1) aquellos que buscan minimizar los costes totales de mantenimiento e inversión asociados a una tubería y, por otro, (2) los que tienen como objetivo maximizar la utilización del presupuesto disponible.

La mayoría de trabajos encontrados en la literatura consideran el primer objetivo, y tratan de estimar el momento ideal de reposición de la tubería equilibrando sus costes de mantenimiento y reposición, esto es, desde un punto de vista exclusivamente económico. Estos modelos, por tanto, plantean un análisis del coste de ciclo de vida. Los parámetros generalmente empleados son:

- Número de roturas pronosticado en la tubería existente, en los próximos años.
- Número de roturas pronosticado para la tubería nueva, en función del tiempo de su instalación.
- Los costes asociados a la reparación de una rotura (costes de mantenimiento).
- Los costes de reemplazar la tubería existente por una nueva (inversión).
- La tasa de descuento, sin inflación (es importante recalcar que los modelos estudiados desprecian la inflación).

Obteniendo para cada material la curva que compara los costes de mantenimiento, reemplazo y totales, se determina el momento óptimo para su reemplazo (Figura 2).

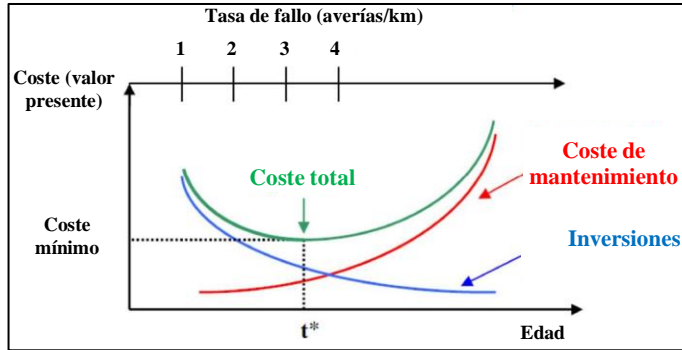


Figura 2: Curvas de costes de reparación, inversiones y costes totales y tiempo óptimo de reemplazo

Como es de esperar, estos modelos basan su éxito de funcionamiento en una estimación precisa de los fallos futuros de las tuberías. Los primeros trabajos fueron desarrollados por Shamir and Howard (1979), por un lado, y Walski and Pelliccia (1982), por otro, quienes propusieron funciones lineales y exponenciales para estimar los fallos futuros de las tuberías. Posteriormente, estos modelos se fueron enriqueciendo con la incorporación de conceptos de probabilidad de fallo (Clark *et al.* 1982), fallos de fugas y válvulas (Walski 1987), así como aspectos estructurales e hidráulicos (Kleiner *et al.* 1998a). Una revisión exhaustiva de los trabajos más relevantes dentro de esta categoría hasta el año 2000 fue desarrollada por Engelhardt *et al.* (2000).

Estos modelos originales sirvieron de base para trabajos posteriores como los propuestos por Kleiner *et al.* (1998b) y Kleiner *et al.* (2001), que consideran una base temporal continua e infinita para desarrollar un enfoque de planificación a largo plazo, Mailhot *et al.* (2003) y Park y Loganathan (2002), que calculan una tasa de rotura umbral o Hong *et al.* (2006), que utilizan un proceso de Poisson no homogéneo para predecir los fallos de las tuberías.

No obstante, este enfoque presenta una desventaja: busca el mínimo coste del ciclo de vida, pero se centra en soluciones analíticas para problemas de una sola tubería de manera individual (Kleiner *et al.* 1998b). Trabajos más recientes adoptan una perspectiva más global a escala de red. Es el caso de Dandy y Engelhardt (2001) y Giustolisi *et al.* (2006), que utilizan diferentes algoritmos genéticos para producir el programa de mantenimiento económicamente casi óptimo para la sustitución de las tuberías, es decir, el tiempo de sustitución de cada tubería que minimiza los costes globales de la red durante el periodo de planificación. Algunos trabajos posteriores incorporan aspectos de fiabilidad (Alvisi y Franchini, 2006; Dandy y Engelhardt, 2006), hidráulicos (Dridi *et al.*, 2008), y de rendimiento (Jayaram y Srinivasan, 2008). Más recientemente, también se han abordado criterios de daños acumulativos (Sheu *et al.* 2021).

Aunque estos enfoques proporcionan soluciones interesantes y casi óptimas, también plantean un importante inconveniente: solo pueden aplicarse a redes de pequeño tamaño o de muestra. Por ejemplo, Dandy y Engelhardt (2001), (2006) aplican sus metodologías a una sección de la red de agua de Adelaida con 488 tuberías y una longitud total de 216 km. Dos ejemplos de redes de tamaño similar comprenden 450 tuberías y 120 km y 152 tuberías y 18 km, respectivamente (Nafi *et al.*, 2008; Nafi y Kleiner, 2010), mientras que otras eran hipotéticas o incluso más pequeñas (Dridi *et al.*, 2008; Jayaram y Srinivasan, 2008). Esto es comprensible, ya que los algoritmos de optimización requieren una gran capacidad de procesamiento y tiempo de cálculo, lo que podría poner en peligro su viabilidad cuando se aplican a redes reales de tamaño medio o grande.

Una vez revisados los trabajos que emplean este enfoque es interesante realizar un pequeño análisis comparativo entre ellos. En primer lugar, y de cara a su posible aplicabilidad al caso de estudio que será objeto de estudio de esta tesis, se propone su clasificación según los datos de entrada que requieren y los parámetros de salida que proporcionan.

2.1.1. Notación

Dado que los modelos revisados difieren de unos a otros en notación y formulación, se ha realizado un esfuerzo de homogenización de la notación, para poder identificar y comparar los parámetros de diferentes trabajos. Esta notación común se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1: Notación empleada en los modelos de análisis de costes del ciclo de vida.

b	Tasa anual de incremento de fallos (1/año)
B_T	Límite de presupuesto en el horizonte de análisis
B_t	Límite de presupuesto para el periodo t
C_b	Coste de reparación de una avería (u.m./avería)
$Cons_i$	Consecuencia de fallo de la tubería i (u.m.)
C_{inf}	Coste total de todos los ciclos de reemplazo de la tubería hasta el infinito (u.m.)
CM	Coste total de mantenimiento (u.m./año)
C_r	Coste de reemplazo de una tubería (u.m./km)
CR	Coste total de reemplazo (u.m./año)
C_{reh}	Coste de rehabilitación por unidad de longitud de tubería (u.m./km)
CREH	Coste de rehabilitación (u.m.)
CT	Coste total asociado a una tubería (u.m./año)
D	Diámetro de una tubería (mm)
Dep_i	Depreciación anual de la tubería i (u.m./año)
FCF	Factor de coste de fallo
FD	Factor de daño
L	Longitud de la tubería (km)

$N(t)$	Número de roturas por unidad de longitud en el año t
$Prob_i$	Probabilidad de fallo de la tubería i
r	Tasa de descuento
t_c^*	Duración óptima del ciclo de reemplazo de una tubería (años)
t_{max}	Vida útil de la tubería (años)
t_r^*	Tiempo óptimo para reemplazar la tubería (año)
t_{reh}^*	Tiempo óptimo para rehabilitar la tubería (año)
VAN	Valor actualizado neto
λ	Tasa de fallo anual (fallos/año/km)
$\bar{\lambda}$	Tasa de fallo anual media (fallos/año/km)
λ^*	Tasa de fallo crítica o “umbral” anual (fallos/año/km)

2.1.2. Análisis comparativo y aplicabilidad

Seguidamente, las Tablas 2 y 3 recogen los datos de entrada y los parámetros de salida que requieren y proporcionan los modelos revisados.

Como se observa en la Tabla 2, para establecer el tiempo óptimo de reemplazo de una tubería es siempre necesario conocer los costes unitarios de reemplazo (C_r) y reparación de averías (C_b), así como estimar un valor de la tasa de descuento (r). Otros parámetros relevantes y comúnmente considerados por los autores son la tasa (λ) o probabilidad ($Prob$) de fallo de una tubería para un momento dado de su vida útil, su longitud (L) y su tasa de crecimiento de fallo (b). En cambio, información relativa al diámetro (D), las consecuencias asociadas al fallo de una tubería ($Cons$) o su tiempo de vida útil (t_{max}) no han trascendido para los autores.

Tabla 2: Clasificación de los modelos revisados según los parámetros de entrada que requieren

Referencia	Parámetros de entrada																
	b	$B_{t/T}$	C_b	C_r	C_{reh}	$Cons_i$	D	FCF	L	FD	$N(t_0)$	$Prob_i$	r	t_{max}	λ_0	λ	Otros
<i>Dandy y Engelhardt (2006)</i>		✓	✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓			✓	
<i>Davis et al. (2008)</i>													✓	✓			✓
<i>Kleiner et al. (2001)</i>	✓		✓	✓					✓		✓		✓				
* <i>Nafi y Kleiner (2010) - Obj_{coste}</i>			✓	✓					✓				✓				✓
* <i>Nafi y Kleiner (2010) - Obj_{presupuesto}</i>		✓		✓					✓				✓				✓
<i>Park y Loganathan (2002)</i>			✓	✓									✓				
<i>Shamir y Howard (1979)</i>	✓		✓	✓							✓		✓				
<i>Shin et al. (2016)</i>			✓		✓			✓	✓				✓			✓	
<i>Ugarelli y Di Federico (2010)</i>			✓			✓			✓			✓	✓			✓	✓
<i>Walski (1987)</i>	✓		✓	✓									✓	✓		✓	✓
<i>Walski y Pelliccia (1982)</i>			✓	✓						✓			✓			✓	✓

* El trabajo de Nafi y Kleiner (2010) presenta dos orientaciones distintas. Una que busca optimizar el coste total en el horizonte de planificación (Obj_{coste}) y otra cuyo objetivo es maximizar la utilización del presupuesto disponible ($Obj_{presupuesto}$)

En cuanto a la salida de los modelos (Tabla 3), todos ellos proporcionan el tiempo óptimo de reemplazo (t^*), siendo esta la variable de decisión en todos los modelos. Respecto a los modelos cuyo enfoque se basa en la minimización de costes e inversiones, estos obtienen también como resultado el coste total asociado a la tubería (CT), desglosado según los costes de mantenimiento de averías (CM) y las inversiones en reemplazo (CR). En cambio, los modelos basados en la tasa de fallo crítica (λ^*) proporcionan este valor, mediante el cual se determina el momento óptimo de reemplazo.

Tabla 3: Clasificación de los modelos propuestos en cada artículo según los parámetros de salida que proporcionan

Referencia	Parámetros de salida											
	C_{inf}	CM	CR	CREH	CT	Dep_i	t_c^*	t_r^*	t_{reh}^*	λ^*	$N(t)$	VAN
Dandy y Engelhardt (2006)					✓			✓				
Davis et al. (2008)								✓				✓
Kleiner et al. (2001)	✓				✓		✓	✓				
* Nafi y Kleiner (2010) - Obj _{Coste}		✓	✓		✓			✓				
* Nafi y Kleiner (2010) - Obj _{Presupuesto}			✓					✓				
Park y Loganathan (2002)								✓		✓		
Shamir y Howard (1979)		✓	✓		✓			✓				✓
Shin et al. (2016)		✓	✓	✓	✓			✓	✓			
Ugarelli y Di Federico (2010)		✓	✓		✓	✓		✓				
Walski (1987)		✓	✓		✓			✓				
Walski y Pelliccia (1982)								✓		✓		

* El trabajo de Nafi y Kleiner (2010) presenta dos orientaciones distintas. Una que busca optimizar el coste total en el horizonte de planificación (ObjCoste) y otra cuyo objetivo es maximizar la utilización del presupuesto disponible (ObjPresupuesto)

Por último, también se realiza un estudio de las ventajas e inconvenientes de cada una de estas metodologías y se discute la aplicabilidad de cada una de estas metodologías a la empresa objeto de estudio. Como puede verse en la Tabla 4, cada metodología ha sido evaluada por colores atendiendo a la posible disponibilidad por parte de la empresa de los datos que requiere cada modelo, la relación complejidad-beneficio y un enfoque de sostenibilidad (tradicionalmente empleado por la empresa y por otras públicas del sector). Así, las metodologías mejor evaluadas (“A” o en color verde) son aquellas que satisfacen en mayor medida todos estos criterios, mientras que las de color amarillo (“B”), aunque no lo cumplen todos los requisitos de manera estricta, pueden servir para tomar ideas o extraer adaptaciones para el modelo que finalmente se implemente. Las identificadas como “C” o en color rojo presentan una metodología no factible para el caso en cuestión.

Tabla 4: Análisis de las ventajas e inconvenientes y evaluación de las metodologías basadas en la gestión de costes.

Referencia	Evaluación	Ventajas	Inconvenientes
<i>Shamir y Howard (1979)</i>	A	Sencillo y útil.	Poco sofisticado.
<i>Kleiner et al. (2001)</i>	C	Evolución de <i>Shamir y Howard (1979)</i> : base temporal continua.	Complejidad/beneficio ↑↑
<i>Walski (1987)</i>	C	Sofisticado.	Requiere información no disponible.
<i>Ugarelli y Di Federico (2010)</i>	B	Incluye consideraciones de riesgo y depreciación.	Requiere evaluación económica de las consecuencias del fallo.
<i>Davis et al. (2008)</i>	A	Más sofisticado que <i>Shamir y Howard (1979)</i> .	Requiere estimación previa de la vida útil de las tuberías y de los costes de reparación
<i>Shin et al. (2016)</i>	B	Consideraciones de factor de coste de fallo.	Requiere datos de los que no se dispone con fiabilidad.
<i>Nafi y Kleiner (2010)</i>	B	Aporta ideas interesantes y emplea enfoque basado en la sostenibilidad.	Utópico. Requiere datos difícilmente cuantificables.
<i>Dandy y Engelhardt (2006)</i>	B	Incluye consideraciones de riesgo, afección a los clientes y presupuesto	Requiere datos difícilmente cuantificables.
<i>Kleiner et al. (1998b)</i>	C	Análisis exhaustivo.	Redes pequeñas. No aplica.
<i>Kim y Mays (1994)</i>	C	Análisis exhaustivo.	Redes pequeñas. No aplica.
<i>Walski y Pelliccia (1982)</i>	A	Similar a <i>Shamir y Howard (1979)</i> . Sencillo. Enfoque de sostenibilidad.	Requiere parámetro difícilmente cuantificable.
<i>Park y Loganathan (2002)</i>	A	Doble enfoque: Min costes y TF crítica.	Considera costes de reparación y reemplazo dependientes del tiempo.

2.2. Metodologías basadas en el seguimiento de indicadores

Este segundo apartado aborda los trabajos revisados dentro del segundo enfoque de metodologías GPI identificado. A su vez, estos métodos constan de dos pasos secuenciales pero independientes.

En primer lugar, es necesario establecer una prioridad de sustitución (índice o puntuación) para cada elemento de la red. Aunque este valor puede ser una estimación del estado de una tubería o de la probabilidad de fallo (*Chen y Guikema, 2020; Jara-Arriagada y Stoianov, 2021; Kielhauser et al., 2016; Robles-Velasco et al., 2020; Yin et al., 2020*) la mayoría de los trabajos revisados combinan tanto la probabilidad como las consecuencias del fallo para calcular un índice de riesgo y obtienen una puntuación que define la urgencia con la que ésta debe ser mantenida

o reemplazada. Conocida esta puntuación, las técnicas permiten obtener un listado ordenado de todos los elementos de la red según su prioridad de reposición.

No obstante, este proceso por sí solo no es suficiente para establecer una planificación de las actividades necesarias sobre la red. Es necesario la definición y el seguimiento de indicadores de desempeño (KPIs) que permitan conocer en todo momento el estado de la red. Una vez definidos, establecer valores objetivo para estos KPIs permite trazar planes operativos, tácticos y estratégicos para garantizar los objetivos a corto, medio y largo plazo.

A continuación, se contextualiza el uso de las técnicas de decisión multicriterio en la priorización de renovación de infraestructuras.

2.2.1. Utilidad y aplicación de las técnicas multicriterio para la priorización de tareas de reemplazo

Las técnicas de decisión multicriterio, o *multi-criteria decision (MCD) methods*, son herramientas que permiten estructurar un problema de decisión complejo, para evaluar diferentes alternativas y elegir la óptima de acuerdo con ciertos criterios. Por ejemplo, permite combinar información sobre el estado de una tubería y su potencial impacto en caso de un fallo de la misma, y obtener una idea de su prioridad de reposición. De esta manera, se puede fijar la prioridad entre renovar un tramo que tiene una alta probabilidad de fallo u otro que tiene una probabilidad menor, pero que abastece a un cliente relevante o sensible como, por ejemplo, un hospital. Así, un proceso correcto de toma de decisiones en la gestión de infraestructuras es vital para evitar el empleo innecesario de recursos o maximizar el beneficio económico.

La Figura 3 muestra algunos tipos de infraestructuras sobre los que más se habían aplicado métodos de decisión multicriterio hasta el año 2014 (Kabir *et al.* 2014). Se observa, efectivamente, que los sistemas de redes de abastecimiento y saneamiento

componen una infraestructura sobre la que habitualmente se aplican este tipo de técnicas.

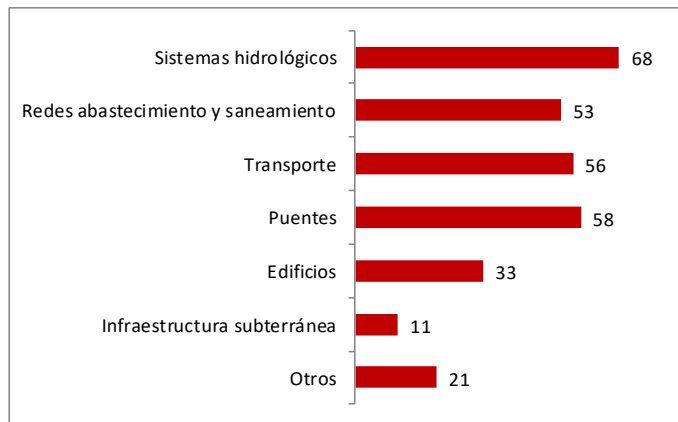


Figura 3: Aplicación de técnicas multicriterio en diversos tipos de infraestructuras (Kabir *et al.* 2014)

Los mismos autores recogen datos sobre la creciente investigación sobre los métodos multicriterio y su creciente importancia en todos los campos. En las últimas décadas se ha intensificado el interés en la aplicación de herramientas de decisión multicriterio debido a la complejidad de los problemas, así como a la alta disponibilidad de datos. De la Tabla 5 se extrae cómo el interés ha crecido especialmente en las instalaciones hidráulicas, en las redes de agua, transporte y otras infraestructuras como puentes o edificios.

Tabla 5: Trabajos desarrollados sobre técnicas MCD según aplicación entre 1980 y 2012 (Kabir *et al.*, 2014)

Periodo	Sistemas hidrológicos	Redes			Edificios	Infraestructura subterránea	Otros	Total
		abastecimiento y saneamiento	Transporte	Puentes				
1980-1982	1	0	0	0	0	0	0	1
1983-1985	1	0	0	0	0	0	0	1
1986-1988	2	0	0	1	0	0	0	3
1989-1991	1	1	3	2	1	0	0	8
1992-1994	3	3	2	2	0	0	0	10
1995-1997	9	4	4	2	1	0	0	20
1998-2000	5	2	5	3	3	1	0	19
2001-2003	10	1	9	1	3	1	0	25
2004-2006	12	9	7	18	8	1	3	58
2007-2009	11	13	12	11	11	5	2	65
2010-2012	13	20	14	18	6	3	16	90
Total	68	53	56	58	33	11	21	300

Las diversas técnicas multicriterio difieren en complejidad, precisión necesaria, incertidumbre admisible, procesamiento en los datos de entrada, etc. La Tabla 6 muestra este interés creciente en diferentes las técnicas MCD: AHP ha sido el método sobre el que más se ha escrito en los últimos años, dejando constancia de su eficacia y versatilidad, seguido de las técnicas ELECTRE y PROMETHEE.

Tabla 6: Artículos desarrollados sobre técnicas MCD según método entre 1980 y 2012 (Kabir *et al.*, 2014)

Periodo	AHP	ELECTRE	PROMETHEE	WSM	TOPSIS	Métodos combinados	
						Otros	Otros
1980-1982	0	0	0	0	0	1	0
1983-1985	0	0	0	0	0	1	0
1986-1988	1	0	1	0	0	1	0
1989-1991	3	0	0	0	0	4	1
1992-1994	3	0	0	0	0	6	1
1995-1997	2	4	4	1	0	8	1
1998-2000	4	2	1	0	0	12	0
2001-2003	9	1	2	3	2	5	3
2004-2006	11	3	4	1	2	34	4
2007-2009	16	2	3	3	3	31	7
2010-2012	23	7	4	2	9	41	3
Total	72	19	19	10	16	144	20
Porcentaje	24,0%	6,3%	6,3%	3,3%	5,3%	48,0%	6,7%

En la Tabla 7 se muestra una relación de las publicaciones sobre los métodos MCD más empleados en cada área de aplicación. Según Kabir *et al.* (2014), para la gestión de las tuberías de las redes de abastecimiento y saneamiento, estos son AHP, ELECTRE y PROMETHEE, así como los híbridos.

Tabla 7: Distribución de artículos sobre métodos multicriterio según área de aplicación (Kabir *et al.*, 2014)

Área de Aplicación	Métodos							Total
	AHP	ELECTRE	PROMETHEE	WSM	TOPSIS	combinados	Otros	
Sistemas hidrológicos (%)	7,4	4,4	13,2	4,4	1,5	52,9	16,2	100
Redes abastecimiento y saneamiento (%)	28,3	15,1	13,2	3,8	1,9	28,3	9,4	100
Transporte (%)	53,6	8,9	1,8	3,6	7,1	25,0	0,0	100
Puentes (%)	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	87,9	0,0	100
Edificios (%)	15,2	6,1	3,0	3,0	15,2	48,5	9,1	100
Infraestructura subterránea (%)	36,4	9,1	9,1	9,1	0,0	27,3	9,1	100
Otros (%)	28,6	0,0	0,0	4,8	23,8	42,9	0,0	100

Además, la aceptación de estas técnicas no es homogénea en todas las partes del mundo. Su empleo varía no solo en función del campo de aplicación, sino también de la región del mundo. Hasta 2014, los métodos AHP y los híbridos han sido claramente los más empleados en términos absolutos. Su aceptación es mayor en Norteamérica, Asia y Europa (Tabla 8).

Tabla 8: Distribución de los métodos MCD en función de la región (Kabir *et al.*, 2014)

Métodos DMC	Norteamérica	Asia	Europa	Sudamérica	Australia	África	Total
AHP	17	31	19	2	2	1	72
ELECTRE	2	2	9	5	1	0	19
PROMETHEE	3	5	6	3	2	0	19
WSM	4	4	1	0	0	1	10
TOPSIS	2	7	7	0	0	0	16
Métodos combinados	67	38	35	2	2	0	144
Otros	3	10	7	0	0	0	20
Total	98	97	84	12	7	2	300

A continuación, se expone el resultado de la revisión de los artículos encontrados en la bibliografía referentes al análisis multicriterio y su aplicación en infraestructuras de abastecimiento y saneamiento.

Es importante tener en cuenta que la toma de decisiones multicriterio requiere de dos procesos diferenciados. En primer lugar, una ponderación de los criterios que influyen en la decisión, mediante el cálculo de pesos de importancia para cada factor (apartado 2.2.2). En segundo lugar, una vez conocidas las ponderaciones de cada criterio, el establecimiento de una priorización de las alternativas a adoptar por el decisor (apartado 2.2.3).

2.2.2. Técnicas multicriterio para la evaluación de importancia de los factores de decisión

Los métodos que se emplean en la primera etapa del proceso se denominan métodos de evaluación y sirven para extraer de la opinión de un grupo de expertos una estimación de las importancias relativas de ciertos factores Rodríguez (2017). Los métodos de valoración revisados en este documento son 1) proceso de jerarquía analítica (AHP), 2) elección discreta (ED) y 3) ajuste por regresión lineal múltiple (RLM).

2.2.2.1. Proceso de jerarquía analítica (AHP)

El proceso de jerarquía analítica o *analytic hierarchy process* (AHP) fue propuesto por Saaty (1990) y se basa en obtener preferencias y ponderaciones de importancia a los criterios y a las alternativas.

En este método, los criterios y las alternativas se estructuran de manera jerárquica, donde el nivel más alto de la jerarquía se corresponde con el objetivo general del problema. Luego los objetivos desde una perspectiva amplia a través de los niveles intermedios, que son los criterios. Finalmente el nivel más bajo, que es el conjunto de alternativas (Saaty, 2008).

En la metodología AHP, tanto los criterios como las alternativas se consideran independientes entre ellos. Una de las principales ventajas de esta técnica es la posibilidad de emplear criterios tanto de carácter cualitativo como cuantitativo. Además, los problemas de decisión pueden fragmentarse en elementos más pequeños, evidenciando cada criterio aplicado y el cálculo del índice de consistencia permite comprobar la consistencia de los juicios realizados. Por otro lado, los inconvenientes del método son la pérdida de información debido a una incorrecta ponderación de los criterios y la complejidad y tiempo requerido en su implementación (Kabir *et al.*, 2014; Tscheikner-Gratl *et al.*, 2017). Una descripción detallada del procedimiento de la metodología AHP se describe en el Anexo B.

Por otro lado, como se indicó al principio de este apartado, la necesidad una reposición de un elemento de la red se basa en dos elementos: 1) el estado o condición de un elemento, esto es, su probabilidad de fallo, y 2) el impacto o consecuencias que tendría dicho fallo.

Los artículos que aplican AHP pueden clasificarse según aquellos que emplean técnicas multicriterio para determinar, en primer lugar, la condición de un elemento de la red y, en segundo lugar, las consecuencias asociadas al mismo. La combinación de ambos forma el concepto de riesgo y supone el criterio principal para priorizar tareas de reposición.

Determinación del estado de un tramo de la red

Los factores que intervienen en el proceso de degradación de una tubería son muy diversos y su influencia en el posible deterioro o su importancia en el modelo a emplear depende de muchos factores. Entre ellos destacan la ubicación de la red, el conocimiento preciso o no de los mismos, su relación con roturas históricas, etc. Además, ciertos factores pueden estar subrogados a otros y ser tenidos en cuenta de forma indirecta.

Por ejemplo, Al-Barqawi y Zayed (2006) agrupan once factores diferentes en tres categorías: físicos (tipo, tamaño y edad de la tubería), ambientales (nivel freático y tipo de suelo, de superficie y de camino) y operacionales (tasa de fallo, factor Hazen-Williams o factor C, presión operacional y protección catódica). En su trabajo concluyeron que los factores más influyentes en la condición de la tubería fueron la edad (20.95%) y el tipo de material (17.49%). El tipo de área servida resultó ser el factor menos relevante (2.85%).

En un trabajo posterior, los mismos autores integran el proceso de jerarquía analítica y la técnica red neuronal artificial o *artificial neural network* (AHP/ANN). ANN es un modelo computacional basado en un conjunto de unidades neuronales simples, de forma similar al comportamiento de las neuronas en los cerebros biológicos. El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano. Los autores justifican el empleo conjunto de las dos técnicas en que AHP solo evalúa la condición teniendo en cuenta los factores asignados sin ningún tipo de análisis y que esta no puede tratar los datos incompletos. ANN solventa este problema mediante el reconocimiento de patrones. Esta técnica se utiliza para desarrollar tendencias y modelos de deterioro de la red de agua y, además, es flexible para agregar nuevos datos y mejorar su análisis (Al-Barqawi y Zayed, 2008).

Una clasificación similar fue propuesta por Popawala y Shah (2014). Físicos: material, diámetro, edad y longitud de la tubería; ambientales: profundidad de la instalación y carga de tráfico en la carretera; y operacionales: presión interna del agua, número de fallos, factor C y grosor de la tubería. Nuevamente, la edad resultó ser el factor más relevante.

Posteriormente, Li *et al.* (2015) emplean un AHP de tres escalas mejorado (IAHP) para evaluar la condición de las tuberías de las redes de agua del distrito de Boacheng, China. En este caso, los factores se agrupan en internos (edad, diámetro y material de la tubería) y externos (tipo de pavimento, calidad de la construcción y otros factores ambientales).

Finalmente, El Chanati *et al.* (2016) evalúan mediante la calidad de la instalación y el material, tamaño y edad de la tubería (factores físicos), el suelo que rodea la tubería, el nivel del agua subterránea y el tipo de superficie sobre la que se instala la tubería (factores ambientales) y el coeficiente de Hazen-Williams (factor C), la tasa de rotura histórica y la calidad del agua que se transporta (factores operacionales). En este trabajo se comparan cuatro métodos distintos para el cálculo del peso de los factores: AHP, AHP difuso (FAHP), proceso analítico en red o *Analytic Network Process* (ANP) y *Fuzzy ANP* (FANP).

Determinación de la prioridad de reposición de un elemento de red

Una vez se conoce la probabilidad de fallo de una tubería, esta debe combinarse con la información sobre las consecuencias de este y el potencial impacto que tendría. Ambos conjuntamente forman el concepto de riesgo, que es generalmente usado para establecer priorizaciones entre las tareas de renovación. En este sentido, sólo se ha encontrado dos trabajos:

En este ámbito destaca el trabajo realizado por Marlow *et al.* (2012), en el que los autores emplean la técnica AHP para establecer ponderaciones a los factores que influyen en la decisión de qué válvulas rehabilitar. Para ello, los autores evalúan el riesgo de fallo de una tubería considerando factores relacionados tanto con la probabilidad como con la consecuencia de fallar.

Para aplicar la técnica, se llevó a cabo un cuestionario a trece individuos con conocimiento apropiado sobre los problemas de mantenimiento de las válvulas. Los resultados de los pesos que ponderan cada factor se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Pesos de importancia de los factores que influyen en la decisión de rehabilitar una válvula (Marlow et al., 2012)

Probabilidad de fallo	%	Consecuencia de fallo	%
Diseño general	6,28	Tiempo de aislamiento	3,12
Localización	1,71	Distancia a los activos de apoyo	0,67
Uso	5,18	Clientes afectados	6,38
Mantenimiento	2,89	Clientes importantes	14,58
Rendimiento	10,53	Incumplimiento reglamentario	10,56
Condición estructural	4,26	Costes directos	4,39
Edad	4,94	Reputación	1,46
Ambiente externo	8,42	Impacto ambiental	3,45
Ambiente interno	5,80	Interrupción ferroviaria	1,70
		Interrupción del tráfico	1,76
		Daños en la infraestructura	1,93
Total	50	Total	49

De este estudio se deduce que, de los factores que influyen en la consecuencia de un fallo de una válvula, los más relevantes son el impacto que causaría el fallo de dicho componente en clientes importantes y la posibilidad de cometer alguna infracción. Resultaron ser factores menos relevantes la distancia a otros activos de apoyo, el posible perjuicio que sufriría la reputación de los gestores o las interrupciones ferroviarias o del tráfico.

2.2.2.2. Elección discreta (ED)

Los modelos de elección discreta son “una poderosa herramienta para modelar el comportamiento de los individuos en la selección entre alternativas discretas” Rodríguez (2017). Estos modelos se basan en un comportamiento racional de los individuos, que han de seleccionar de entre varias alternativas aquella que tiene mayor utilidad.

Esta técnica emplea modelos *multi-logit*, que permiten presentar fielmente la elección entre elementos discretos. El ajuste de los modelos requiere que los individuos

completan experimentos en los que deben elegir entre situaciones similares a las reales. Estos modelos se denominan “de preferencias declaradas” (Rodríguez, 2017). Una descripción detallada del procedimiento de la metodología se expone en el Anexo B.

Esta técnica no ha sido aplicada generalmente a infraestructuras hidráulicas, pero sí en ámbitos de planificación de transporte como, por ejemplo, en Márquez y Monsalve (2009), donde se presentan los resultados de una encuesta de preferencias diseñada para estimar la demanda potencial de un nuevo sistema de transporte tipo tren entre Tunja y Bogotá, Colombia. Otro caso se muestra en Pompilio-Sartori (2006), donde se emplean modelos de elección discreta para estimar la demanda del transporte urbano en la ciudad de Córdoba, Argentina.

No obstante, los modelos de elección discreta son aplicables no solo a la planificación del transporte, sino a numerosos escenarios: Albaladejo-Pina y Díaz-Delfa (2003) exponen el trabajo realizado para determinar el perfil del turista que con mayor probabilidad elige una determinada zona dentro la región de Murcia, mientras que Inza *et al.* (2008) aplican un modelo de elección discreta a una muestra representativa de la población de Navarra (España) para determinar los factores médicos y sociales según los que los pacientes deben ser priorizados para operaciones quirúrgicas.

2.2.2.3. Ajuste por regresión lineal múltiple (RLM)

El ajuste por regresión es "una herramienta estadística para explicar el comportamiento de una variable dependiente, denominada y , en función de k variables independientes, denominadas variables explicativas o regresores $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ " (Rodríguez, 2017). La expresión (1) muestra la formulación del modelo de regresión lineal múltiple.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Siendo ε el error estadístico y $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j, \dots, \beta_k)$ el conjunto de parámetros que ha de ser estimado.

Este modelo requiere de la realización previa de un experimento o un conjunto de datos históricos (Montgomery *et al.*, 2002). Una descripción detallada del procedimiento de la metodología se expone en el Anexo B.

Aunque esta técnica ha sido ampliamente en la literatura, no se han encontrado referencias que apliquen la técnica de ajuste por regresión lineal múltiple a la rehabilitación de redes de abastecimiento y saneamiento.

2.2.3. Técnicas multicriterio la priorización de alternativas de inversión

En cuanto a las técnicas de priorización, las que se recogen en este documento se pueden categorizar según las siguientes familias (Tscheikner-Gratl *et al.*, 2017): 1) metodología basada en la matriz de riesgos, 2) metodologías de puntuación de alternativas, en la que se asigna una nota numérica a cada alternativa (modelo de sumas ponderadas, MSP) y 3) metodologías *outranking*, que comparan las alternativas por pares para cada criterio (ELECTRE, PROMETHEE).

2.2.3.1. Metodología basada en la matriz de riesgos

Esta técnica se basa en una matriz de doble entrada que integra y escala en categorías tanto la probabilidad como la consecuencia de los fallos. El riesgo de fallo de una tubería determinada, esto es, su prioridad de sustitución depende de la celda de la matriz a la que esté asignada.

Como ejemplo, Marques *et al.* (2012) utilizan una matriz de riesgo para priorizar las tareas de sustitución en Oeiras y Amadora (Portugal). La probabilidad y las consecuencias del fallo, que se escalan de 1 a 5, dependen del material de la tubería y del número potencial de clientes afectados, respectivamente. Una mejora de este trabajo incorpora una estimación más sofisticada de las consecuencias del fallo

(Antunes *et al.*, 2012). Kane *et al.* (2014) y Baah *et al.* (2015) también utilizan una matriz de riesgo para identificar las tuberías críticas en Sídney y en una ciudad mediana de Ontario, respectivamente. Los dos últimos ejemplos clasifican los tramos de calles según urgencia de intervención (Elsawah *et al.*, 2016) y minimizan el riesgo de déficit de demanda y presión de agua no suministrada una ciudad en la provincia de Bolzano, Italia (D'Ercole *et al.*, 2018).

Cabe mencionar que esta técnica permite realizar un análisis equilibrado entre probabilidad y consecuencias (Figura 4), darle más peso relativo a la probabilidad de un fallo (Figura 5) o centrarse en sus consecuencias asociadas (Figura 6).

Clasificación del riesgo (equilibrado)		Consecuencia del fallo				
		1	2	3	4	5
Porabilidad de fallo	5	Bajo	Medio	Alto	Extremo	Extremo
	4	Bajo	Medio	Alto	Alto	Extremo
	3	Despreciable	Bajo	Medio	Alto	Alto
	2	Despreciable	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	1	Despreciable	Despreciable	Bajo	Bajo	Bajo

Figura 4: Análisis de riesgo equilibrado entre probabilidad y consecuencias de fallo.

Clasificación del riesgo (centrado en la probabilidad de fallo)		Consecuencia del fallo				
		1	2	3	4	5
Porabilidad de fallo	5	Extremo	Extremo	Extremo	Extremo	Extremo
	4	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
	3	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto
	2	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Bajo	Bajo

Figura 5: Análisis de riesgo centrado en la probabilidad de fallo.

Clasificación del riesgo (centrado en las consecuencias del fallo)		Consecuencia del fallo				
		1	2	3	4	5
Probabilidad de fallo	5	Bajo	Medio	Alto	Alto	Extremo
	4	Despreciable	Bajo	Alto	Alto	Extremo
	3	Despreciable	Bajo	Medio	Alto	Extremo
	2	Despreciable	Bajo	Medio	Alto	Extremo
	1	Despreciable	Despreciable	Bajo	Alto	Extremo

Figura 6: Análisis de riesgo centrado en la probabilidad de fallo.

No obstante, aunque la matriz de riesgo es una técnica sencilla y potente, no es muy práctica para las redes a escala real. Cuando hay que considerar un gran número de tuberías y asignarles un índice de riesgo, se asignarían demasiados elementos a la misma celda de la matriz y no se podría distinguir entre su prioridad de sustitución.

2.2.3.2. Metodología basada en la puntuación de alternativas: método de sumas ponderadas (MSP)

La segunda técnica de decisión multicriterio es el modelo de suma ponderadas (MSP), o *weighted sum model (WSM)*, que asigna a cada tubería una puntuación de riesgo calculada como la suma de las puntuaciones de cada factor ponderada por su importancia relativa y que equivale a un índice de prioridad para su sustitución.

Éste es uno de los métodos de toma de decisiones multicriterio más empleados dada su sencillez y facilidad de aplicación: consiste en puntuar a cada alternativa i con un valor A_i , resultante de multiplicar el desempeño de la alternativa i en el criterio j , x_{ij} , por el peso del criterio j , w_j , que ha debido de ser calculado previamente. Además se debe garantizar que la suma de todos los pesos es igual a uno (ecuación (2)).

$$A_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot w_j \quad (2)$$

Sin embargo, el valor de las evaluaciones debe ser normalizado previamente mediante, por ejemplo, una normalización lineal (3).

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min_j}}{x_{max_j} - x_{min_j}} \quad (3)$$

Una descripción detallada del procedimiento de la metodología de puntuación de alternativas, MSP, se expone en el Anexo B.

Como ejemplo de aplicación del MSP, Monteiro *et al.* (2008) aplican esta técnica para priorizar la renovación de tuberías en la red de abastecimiento de agua de Lisboa. El modelo integra factores físicos, operativos y económicos que dan como resultado una puntuación de riesgo que clasifica las tuberías para su renovación. Trabajos similares se aplicaron en dos municipios de Canadá (Zayed y Mohamed, 2013), una red egipcia (Marzouk *et al.*, 2015) y una pequeña sección de la red de la ciudad de Malatya en Turquía (Kilinç *et al.*, 2018).

Perspectivas ligeramente diferentes fueron propuestas por Ferreira *et al.* (2013), que calculan un índice de sostenibilidad para los servicios del ciclo urbano del agua y Rogers y Grigg (2009), que estiman el riesgo de fallo de una tubería con un WSM o el producto directo de su probabilidad y consecuencia de fallo -que es similar a la técnica de la matriz de riesgo- en función de su número de registros de rotura.

El MSP también puede utilizarse para calcular riesgos intermedios como los índices estructurales, ambientales e hidráulicos (Chavarriaga Hernández y Montoya, 2013) o índices de vulnerabilidad y peligrosidad (Mamo, 2015). Por último, esta técnica también se ha utilizado para priorizar no solo objetos de tuberías, sino tramos enteros de calles que incluyen la coexistencia de pavimento, distribución, saneamiento (Shahata y Zayed, 2013; Tschekner-Gratl *et al.*, 2016a) y conjuntos de elementos conectados (El-Abbasy *et al.*, 2016).

2.2.3.3. Metodologías *outranking*: ELECTRE y PROMETHEE

Dado que la matriz de riesgo y el WSM son técnicas sencillas y eficientes, se han utilizado ampliamente en la literatura. No obstante, existen otras técnicas para clasificar los objetos de tubería para su sustitución, como los métodos *outranking* ELECTRE (Carriço *et al.*, 2012b; Trojan y Morais, 2012) y PROMETHEE (Fontana y Morais, 2013b). Además, para manejar las incertidumbres relacionadas con el riesgo de fallo, se utilizan habitualmente técnicas de aprendizaje automático (Wang y Li, 2020), métodos basados en la lógica difusa (Al-Zahrani *et al.*, 2015; Anbari *et al.*, 2017; Christodoulou *et al.*, 2009; Phan *et al.*, 2019; Salehi *et al.*, 2020) o modelos bayesianos (Kabir *et al.*, 2015).

ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalite*) fue desarrollado por Roy (1968) y se basa en comparar cada par de alternativas respecto de los diferentes criterios y ver cuántos criterios (y de qué peso conjunto) están a favor de que una alternativa domine a otra y cuántos criterios están en contra.

Según Kabir *et al.* (2014), las principales ventajas de los métodos ELECTRE es que son aplicables para atributos tanto cualitativos como cuantitativos, así como cuando la información disponible es incompleta o incierta. Por otro lado, se trata de una técnica cuya aplicación es compleja y costosa en tiempo.

En cuanto a la técnica PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations*) es una técnica fácil de comprender en comparación con otros métodos *outranking* y es aplicable aun cuando la información requerida es incompleta. Sin embargo, todas las variantes de esta técnica consumen mucho tiempo y es difícil para el decisor obtener una visión clara del problema cuando se utilizan muchos criterios (Tscheikner-Gratl *et al.*, 2017).

En el Anexo B constan descripciones detalladas de los métodos ELECTRE y PROMETHEE.

2.2.3.4. Resumen

Como se ha demostrado en este apartado, las técnicas multicriterio permiten estructurar un problema de decisión complejo para evaluar diferentes alternativas y elegir la óptima de acuerdo a unos criterios.

Por otro lado, un adecuado mantenimiento de las redes de abastecimiento y saneamiento es muy complejo debido a la cantidad de factores que influyen en estado e importancia de cada tubería que la forma.

Para ello, el empleo de las técnicas multicriterio permite establecer una priorización óptima de las inversiones a realizar en la rehabilitación o reemplazo de tuberías y evitar el empleo innecesario de recursos o maximizar los beneficios económicos.

Primero, las técnicas MCD asignan una importancia relativa entre los criterios que influyen en la decisión mediante el cálculo de pesos de importancia y, en segundo lugar, establecer una priorización de las alternativas a adoptar por el decisor.

Los métodos que se emplean en la primera etapa del proceso se denominan métodos de evaluación y sirven para extraer de la opinión de un grupo de expertos una estimación de las importancias relativas de ciertos factores. Los métodos AHP, elección discreta y el modelo de ajuste por regresión lineal múltiple son los métodos de valoración recogidos en este documento.

De estas tres técnicas, la más empleada en la literatura ha sido AHP, especialmente para definir la importancia relativa entre los factores que influyen en la determinación del estado de una determinada tubería.

A modo de resumen, la Tabla 10 recoge los factores considerados por los autores en cada uno de los trabajos revisados. Ésta muestra, además de las ponderaciones extraídas de cada artículo, un promedio para cada factor y la suma de todos los correspondientes a un mismo ámbito (físico, ambiental y operacional).

Tabla 10: Factores para determinar el estado de la tubería, con sus pesos de importancia, recogidos de la literatura

Referencia	Factores físicos					Factores ambientales					Factores operacionales						
	Edad	Material	Diámetro	Longitud	Grosor	Tipo de suelo	Tipo de calle (tráfico)	Tipo de área servida	Nivel freático	Profundidad instalación	Número de averías	Factor C	Calidad del agua	Presión operación	Protección catódica	Calidad instalación	
Al-Barqawi y Zayed (2006), Al-Barqawi y Zayed (2008)	20,95%	17,49%	10,31%	-	-	9,31%	3,20%	2,85%	4,87%	-	13,13%	3,89%	-	6,16%	7,84%	-	
Popawala y Shah (2014)	24,03%	16,64%	3,81%	5,18%	3,19%	-	6,90%	-	-	6,90%	12,85%	6,47%	-	14,03%	-	-	
Li <i>et al.</i> (2015)	47,78%	19,35%	7,86%	-	-	2,63%	15,93%			-	-	-	-	-	-	6,45%	
El Chanati <i>et al.</i> (2016)	AHP	9,22%	9,80%	8,54%	-	-	11,98%	-	8,08%	11,65%	-	9,15%	10,38%	9,25%	-	-	11,94%
	FAHP	9,02%	10,18%	8,53%	-	-	11,72%	-	8,10%	11,91%	-	9,20%	10,40%	9,30%	-	-	11,65%
	ANP	8,28%	9,05%	9,70%	-	-	13,35%	-	7,12%	13,39%	-	9,61%	8,10%	10,07%	-	-	11,34%
	FANP	8,19%	9,48%	9,56%	-	-	12,98%	-	7,14%	13,68%	-	9,76%	8,13%	10,21%	-	-	10,87%
Promedio	25,36%	15,78%	7,77%	1,30%	0,80%	6,11%	6,51%	3,49%	5,84%	2,30%	8,85%	4,90%	2,43%	5,05%	1,96%	4,48%	
Total	50,99%					24,25%					27,67%						

De la tabla se deduce que los factores físicos son los más relevantes a la hora de determinar la condición de la tubería, seguidos de los operacionales y de los ambientales.

Además, entrando en detalle se observa que, de todos los factores, los más relevantes son la edad de la tubería, con más de un 25% de importancia relativa frente al resto de factores y el material de la tubería, con un peso de casi el 16% (ambos factores físicos de la tubería). En cuanto a los operacionales, el número de averías es también un factor considerado comúnmente en la literatura. Con casi un 9%, es el tercer factor más importante. Por último, el tipo de suelo, la carga debida al tráfico, y el nivel freático, con un peso de aproximadamente un 6%, son los factores ambientales más relevantes.

En cuanto a las técnicas para priorizar alternativas de inversión, las que se estudian en este documento son la metodología basada en la matriz de riesgos, la metodología basada en la puntuación de alternativas (MSP) y los métodos ELECTRE y PROMETHEE.

El MSP es el más empleado en la literatura. Aunque se trata de una técnica poco sofisticada, da buenas soluciones y ayuda a los decisores, lo que la convierte en la más extensamente aplicada.

Son muchos y muy variados los factores que influyen en la decisión sobre dónde realizar las inversiones de rehabilitación o reemplazo, tal y como se ha experimentado en la revisión de la literatura. Por esa razón, y para poder realizar un análisis comparativo en función de los criterios más relevantes empleados por los autores. Los factores se han clasificado según los siguientes tipos:

- Probabilidad de fallo
- Impacto social: Interrupción del servicio, demanda no satisfecha, duración de la intervención, interrupción del tráfico, tipo de edificio, tipo de calle y daños a otras infraestructuras.
- Impacto económico: Costes de mantenimiento, de rehabilitación, de renovación y pérdidas económicas.
- Factores hidráulicos y de rendimiento de la red: Pérdidas de agua, capacidad hidráulica, nivel y velocidad del agua por la tubería.
- Impacto ambiental.
- Reputación de la empresa gestora.

Del estudio llevado a cabo en la literatura, se extrae una información interesante sobre los factores que habitualmente son tenidos en cuenta por los autores para determinar necesidades de inversión. Esa información se resume, comparando además la metodología, en la Tabla 11.

Tabla 11: Clasificación de los factores empleados en la literatura en función de la metodología empleada

	Factor	Matriz de riesgo	MSP	ELECTRE	PROMETHEE
Estado	Probabilidad de fallo	✓	✓	✓	✓
	Interrupción del servicio	✓	✓		
Impacto social	Demanda no satisfecha	✓		✓	
	Duración de la intervención		✓	✓	✓
	Interrupción del tráfico	✓			
	Tipo de edificio		✓		
	Tipo de calle		✓		
	Daños a otras infraestructuras	✓			
Impacto económico	Coste de mantenimiento		✓	✓	✓
	Coste de renovación		✓		
	Coste de rehabilitación	✓	✓	✓	✓
	Pérdidas económicas	✓	✓		
Factores hidráulicos y de rendimiento de la red	Pérdida de agua	✓	✓	✓	✓
	Capacidad hidráulica		✓	✓	
	Nivel del agua en la tubería		✓	✓	
	Velocidad del agua			✓	
	Impacto ambiental		✓		
	Reputación	✓			

- Resulta evidente que el estado de la tubería es un factor determinante para decidir acometer una intervención. Por esa razón, la probabilidad de fallo del elemento es un factor siempre presente y necesario para realizar un análisis de prioridad.
- El impacto social asociado a un fallo es un factor también muy relevante y que los decisores deben tener en cuenta. De la literatura revisada se concluye que criterios como la interrupción del servicio, la demanda insatisfecha y la duración de la intervención son los aspectos que más acusan los afectados.
- En cuanto al impacto económico, los factores más comúnmente empleados por los autores son los costes de rehabilitación/renovación, fundamentales

para estimar una correcta planificación de las necesidades de inversión.

- Por último, las pérdidas de agua originadas de un fallo en la red es el factor hidráulico más relevante en cuanto a la eficiencia de la red.

2.2.3.5. Aplicabilidad

A continuación, y en base a la literatura revisada, se discute la conveniencia e idoneidad de aplicación dentro de este segundo enfoque de cada una de las técnicas MCD e indicadores analizados, respectivamente, teniendo en cuenta la empresa de aguas objeto de aplicación en el caso de estudio que se presenta más adelante en esta tesis.

En la literatura se han identificado los siguientes tipos de técnicas de decisión multicriterio: 1) matriz de riesgos, 2) modelo de sumas ponderadas (MSP), o *weighted sum model* (WSM) y las de *outranking*: ELECTRE y PROMETHEE.

Según los trabajos revisados, la técnica más empleada es el modelo de sumas ponderadas (MSP). Esta técnica consiste en asignar una nota numérica a cada alternativa de reposición, siendo esta puntuación la que determina el orden de reemplazo de los elementos de la red.

De entre las técnicas revisadas, MSP puede resultar de gran interés por varios motivos:

- La puntuación asignada es perfectamente comparable de una alternativa a otra, permitiendo establecer claramente un orden de prioridad en su ejecución.
- Permite integrar en un modelo conceptos de probabilidad y consecuencias de fallo, dirigiendo la prioridad de reposición por criterios relacionados con el riesgo de fallo de los tramos de red.

- Es una técnica más sencilla que las de *outranking* (ELECTRE y PROMETHEE), aunque igualmente eficaz y potente para priorizar alternativas de inversión.
- Se trata de una técnica más sofisticada que la matriz de riesgo, pues permite asignar una puntuación continua a cada alternativa. En cambio, la técnica de matriz de riesgo, al categorizar tramos de red en “celdas”, asigna valores discretos del riesgo, y no permite diferenciar con suficiente precisión entre las prioridades de dos tramos de red. Esta cuestión puede ser especialmente problemática en la implementación a una red de tamaño real, como la del caso del caso de estudio de este trabajo, con cerca de 230.000 elementos a priorizar.

Por estos motivos, MSP es la técnica más empleada en la literatura y la que resulta, a priori, más idónea para su aplicación.

Por otro lado, la técnica MSP combina diferentes factores relacionados con las probabilidad y consecuencia del fallo para obtener una priorización basada en criterios de riesgo. Para ello, será necesario la utilización de otras técnicas para la evaluación de importancia de los factores de decisión. En la literatura se han identificado tres técnicas: 1) AHP, 2) elección discreta (ED) y 3) ajuste por regresión lineal múltiple (RLM).

Aunque las tres técnicas son perfectamente aplicables, existen algunas apreciaciones que han de ser tenidas en cuenta. Las tres técnicas requieren del juicio de expertos. La técnica AHP requiere que un conjunto de expertos defina una importancia relativa preliminar entre los distintos factores que intervienen en el modelo, esto es, una relación de importancia numérica entre un factor y otro. En cambio, mediante las técnicas ED y RLM, los expertos inducen sus conocimientos a través de cuestionarios en los que tienen que elegir o valorar ciertas alternativas.

Concretamente, en el análisis de elección discreta, el decisor debe escoger una de entre dos alternativas. Por ejemplo, el decisor podría identificar el tramo de red (entre dos opciones) con mayor prioridad en función a unos valores de probabilidad y posible impacto de un fallo. En cambio, en el análisis de regresión lineal multivariable, el decisor debe asignarle una puntuación numérica, por ejemplo, entre 0 y 10 a cada alternativa de reposición, siendo 0 la no necesidad de reposición, y 10 que la sustitución se debe acometer urgentemente.

Por tanto, se puede deducir que la técnica AHP es la que incorpora un mayor elemento de subjetividad, lo que a priori no es deseable. Y en cuanto a las otras dos técnicas, se puede hacer el siguiente razonamiento: mientras en los cuestionarios de ED, el encuestado simplemente debe elegir entre dos alternativas, en los de RLM pueden aparecer efectos de escala, según los cuales algunos técnicos pueden otorgar puntuaciones en general muy altas y otros muy bajas, aunque realmente coincidan en sus apreciaciones sobre la prioridad de tramos a sustituir. Estos efectos de escala pueden desvirtuar en cierta medida los resultados numéricos obtenidos de los análisis de regresión. Por esta razón, la técnica ED resulta, a priori, más adecuada.

Así, una realizado este análisis de conveniencia, se concluye que la propuesta más interesante para establecer una priorización relativa entre las alternativas de reposición consiste en la obtención de una puntuación basada en conceptos de riesgo. Para ello, la herramienta más adecuada es el modelo de sumas ponderadas (MSP). A su vez, para definir la importancia relativa entre los factores que intervienen en dicho modelo, la técnica de elección discreta (ED) es la más idónea.

2.2.4. Indicadores

Una vez estudiadas las técnicas que establecen una priorización entre las tareas de reposición en la red, es necesario definir planificar las necesidades de inversión. Es decir, determinar cuándo, dónde y en qué cantidad es necesario invertir para

cumplir con los objetivos marcados por la empresa. Esto es lo que se conoce como un plan director de inversiones (PDI).

No obstante, para poder cuantificar los objetivos, es necesaria la definición de indicadores del estado de la red o de la calidad prestada por la misma (*key performance indicators* o KPIs). Según Alegre y Coelho (2013), una planificación estratégica requiere el establecimiento de objetivos claros, criterios de evaluación asociados a los objetivos, métricas para evaluar los criterios y, finalmente, los objetivos para cada métrica.

Tal y como recogen Cardoso *et al.* (2016b), los planes estratégicos van dirigidos por las empresas a cumplir diversos objetivos. La Figura 7 muestra los principales ámbitos en los que las empresas que gestionan infraestructuras dirigen sus estrategias. Se observa que, para estas empresas, la eficiencia y rehabilitación de sus activos son las metas que más cuidan.

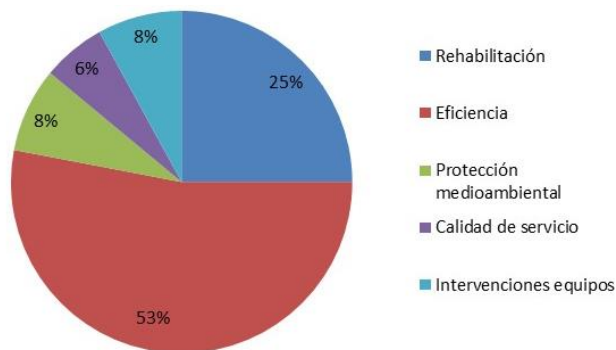


Figura 7: Principales enfoques adoptados por empresas que gestionan infraestructuras

A continuación, se hace una recopilación de los principales indicadores de evaluación de infraestructuras encontrados en la literatura. Además, se realiza una

clasificación de estos en función de su frecuencia de aparición, para determinar cuáles son los más habitualmente empleados.

En primer lugar, Francisque *et al.* (2017) presentan una herramienta de apoyo a la decisión de reemplazo de tuberías basada en su probabilidad de fallo o índice de vulnerabilidad (IV), que se define según la ecuación (4).

$$IV = me^{n(t-t_0)} \quad (4)$$

Donde:

- t Año actual
- t_0 Año de instalación de la tubería
- m, n Coef. de regresión en función del material y diámetro de la tubería

Las curvas de deterioro desarrolladas en este estudio proporcionan una visión general de la vida residual de cada tubería o grupo de tuberías. Cuando el IV de una tubería se aproxima a su valor máximo de 1, se puede suponer que esta ha llegado a su peor condición posible. Este modelo fue implementado en la red de suministro de agua de la ciudad de Kelowna (Canadá).

Alegre y Coelho (2013) y Alegre *et al.* (2013) proponen los siguientes índices para evaluar el desempeño de la red:

- C_{Inv} (u. m.) : Coste de inversión, que representa el valor actual neto en el año 0 de las inversiones.
- IVI (-): Índice del valor de la infraestructura, desarrollado por Alegre *et al.* (2014), que relaciona el valor actual de la infraestructura frente al valor total de su reposición, tal y como se muestra en la ecuación (5). Este permite caracterizar la situación global de la red y aproximar el ritmo de renovación de redes.

$$IVI_t = \frac{\text{Valor de la infraestructura}_t}{\text{Valor de reposición completa de la infraestructura}} \quad (5)$$

Un valor para este indicador inferior a 0.5 indica una red insuficientemente mantenida y un consecuente aumento de los problemas de explotación, mientras que un valor cercano a 1 indica una red demasiado joven o rehabilitada. Por tanto, el IVI_t debe situarse en torno a 0.5, lo que implica un ritmo de renovación adecuado.

- $P_{min} (-)$: Presión mínima en condiciones de operación normales, que garantice el cumplimiento de los requisitos mínimos de demanda en cualquier punto de la red. Esta se mide sobre una referencia mínima de servicio aceptable de 25 mca (metros de columna de agua). Así, un punto cuya presión sea de 50 m, el valor de dicha métrica será 2.
- $P_{min}^* (-)$: Presión mínima en condiciones de emergencia, que garantice el cumplimiento de los requisitos de presión mínima en los puntos de demanda cuando falla el origen de suministro normal.
- $AC (\%)$: Porcentaje de longitud total de la red con tuberías cuyo material es fibrocemento. Se trata de un indicador de la resistencia del sistema, la fiabilidad y la facilidad de mantenimiento.
- $RL \left(\frac{l}{\text{conexión} \times \text{día}} \right)$: Pérdidas reales por conexión.
- $Dem_{NS} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right)$: Valor esperado de la demanda no satisfecha durante un período de 1 año. Mide el riesgo de interrupción del servicio asociado a un componente específico de la red. Este riesgo se calcula para cada tubería como una combinación su probabilidad de fallo y consecuencia.

Los autores también establecen rangos de evaluación, basándose en su experiencia personal, para clasificar los valores de las métricas según “bueno”, “medio” y “pobre” (Tabla 12).

Tabla 12: Valores de referencia para los indicadores (Alegre *et al.*, 2013; Alegre y Coelho, 2013)

Indicador	Bueno	Medio	Pobre
C_{Inv} (u.m.)	0-350	350-450	>450
IVI (-)	0,45 - 0,55	0,30 - 0,45; 0,55 - 0,70	0 - 0,30; 0,70 - 1
P_{min} (-)	3-2	2-1	1-0
P_{min}^* (-)	3-2	2-1	1-0
AC (%)	0-9	9-15	15-100
RL (l x conexión ⁻¹ x día ⁻¹)	0-100	100-150	>150
Dem_{NS} (m ³ x año ⁻¹)	0-20	20-30	30-100

Coelho y Leitão (2012) evalúan el estado de la red de Oeiras y Amadora (Portugal). Para ello consideran un indicador más sobre los que emplean Alegre y Coelho (2013) y Alegre *et al.* (2013). Éste es:

- EDC (-): Eficiencia de diseño comparativo. Relaciona el coste de reemplazar una red diseñada como alternativa y de reemplazar la red existente. Este indicador muestra si la nueva configuración está más cerca o más lejos de una configuración de coste mínimo que la red existente.

Además consideran una variación del indicador Dem_{NS} propuesto por Alegre y Coelho (2013) y Alegre *et al.* (2013):

- RIS (%): Riesgo de interrupción del servicio. Este índice de riesgo considera la probabilidad de fallo de la tubería, estimada con tasas de fallo calculadas por material de tubería, y el impacto asociado a dicho fallo (% de la demanda total no suministrada).

Los valores de referencia para evaluar el desempeño de la red también varían ligeramente en este trabajo: ver la Tabla 13.

Tabla 13: Valores de referencia para los indicadores (Marques et al., 2012)

Indicador	Bueno	Medio	Pobre
C_{inv} (u.m.)	0-350	350-450	> 450
EDC (%)	0-1	1-1,5	>1,5
IVI (-)	0,45 - 0,55	0,30 - 0,45; 0,55 - 0,70	0 - 0,30; 0,70 - 1
P_{min} (-)	3-2	2-1	1-0
P_{min}^* (-)	3-2	2-1	1-0
AC (%)	0-5	5-10	10-100
RL ($l \times conexión^{-1} \times día^{-1}$)	0-100	100-150	> 150
RIS (%)	0-1	1-5	5-100

Ferreira y Carriço (2017) proponen nuevas métricas para la valoración de activos. El primer conjunto de ellas evalúa el rendimiento de la red:

- IVI (-): Aunque se trate del mismo indicador, como se observa en la Tabla 14 los autores deciden aplicar diferentes rangos de referencia para los niveles de evaluación.
- RR (%): Tasa de rehabilitación de la red. Indica el porcentaje de red que ha sido rehabilitado en el último año.
- RL ($\frac{l}{conexión \times día}$): Pérdidas reales de agua en las conexiones de servicio.
- $UIRH$ (-): Uso ineficiente de los recursos hídricos, obtenido a través de la relación entre las pérdidas reales de agua y el volumen de entrada del sistema.
- ANC (%): Agua no contabilizada. Es el porcentaje de agua suministrada al sistema que no se mide y viene dado por la relación entre el volumen de agua no medida y el volumen de agua de entrada del sistema.
- $PPSR$ (-): Nivel de presión promedio sobre el requerido. Índice de rendimiento que permite verificar si se proporciona la presión de servicio

mínima requerida en cada punto de conexión. Esta se mide respecto a la presión de servicio mínima requerida que, de acuerdo con la legislación portuguesa, es de $10+40n$, donde n es el número de pisos sobre el suelo.

El segundo conjunto de índices son los asociados al riesgo:

- $IFT \left(\frac{h}{n^{\circ} \text{ usuarios}} \right)$: Interrupción causada por fallos de tuberías. De acuerdo con la legislación portuguesa, las empresas de agua disponen de seis horas para reparar cualquier fallo del sistema sin tener que notificar a sus usuarios. Este indicador resulta de la relación entre el tiempo de interrupción y la cantidad total de usuarios.
- $IFC \left(\frac{h}{n^{\circ} \text{ usuarios}} \right)$: Interrupción causada por fallos de conexión. Su valor viene dado por la relación entre la extensión del tiempo de la interrupción causado por fallos de conexión y el número total de usuarios de la red entera.
- $TF \left(\frac{n^{\circ} \text{ interv}}{km} \right)$: Tasa de fallo en tuberías. Relación entre el número de intervenciones y la longitud total de la tubería de la red entera.
- $FC (\%)$: Fallo de conexión. Porcentaje entre el número de conexiones que han fallado y el número total de conexiones del servicio.
- $QT (\%)$: Quejas totales. Relación entre el número de usuarios que trasladan quejas sobre el rendimiento de la red y el número total de usuarios.

Y, por último, uno de carácter económico:

- $C_{Op} \left(\frac{u.m.}{km} \right)$: Costes operacionales. Relación entre los costes operacionales de la red y su longitud total. Un rendimiento inadecuado implica un aumento dicho índice.

La Tabla 14 muestra los indicadores de evaluación de la red y sus rangos de valoración empleados por Ferreira y Carriço (2017).

Tabla 14: Valores de referencia para los indicadores (Ferreira y Carriço, 2017)

Indicador	Bueno	Medio	Pobre
<i>IVI (-)</i>	1-0,55	0,55-0,4	0,4-0
<i>RR (%)</i>	4-1	1-0,8	0,8-0
<i>RL (1 x conexión⁻¹ x día⁻¹)</i>	0-100	100-150	>150
<i>UIRH (-)</i>	0-12	12-20	20-100
<i>ANC (%)</i>	0-15	15-25	25-100
<i>PPSR (-)</i>	0-15	15-25	>25
<i>IFT (h x n^o usuarios⁻¹)</i>	0-1	1-2,5	>2,5
<i>IFC (h x n^o usuarios⁻¹)</i>	0-1	1-2,5	>2,5
<i>TF (n^o interv x km⁻¹)</i>	0-30	30-60	>60
<i>FC (%)</i>	0-10	10-20	>20
<i>QT (%)</i>	0-0,5	0,5-1	>1
<i>C_{op} (u.m. x km⁻¹)</i>	0-500	500-600	>600

Los dos siguientes indicadores fueron desarrollados por Cardoso *et al.* (2016a) y Metelka y Svitak (2010), respectivamente:

- *AS (%)*: Porcentaje de activos en servicio (%).
- *Edad*: Edad promedio de la red ponderada por la longitud (años).

El último trabajo revisado es el llevado a cabo por Cardoso *et al.* (2016b), que estudian la GPI implementada por diferentes empresas portuguesas del sector del agua. De él, los autores extraen un interesante resultado sobre los indicadores de valoración de la red que emplean dichas empresas en función de si el sistema que gestionan es de abastecimiento, saneamiento o aguas pluviales, respectivamente.

Las Figuras 8 y 9 muestran el número de empresas de abastecimiento, saneamiento y aguas pluviales, respectivamente, que consideraron un determinado indicador para evaluar sus redes.

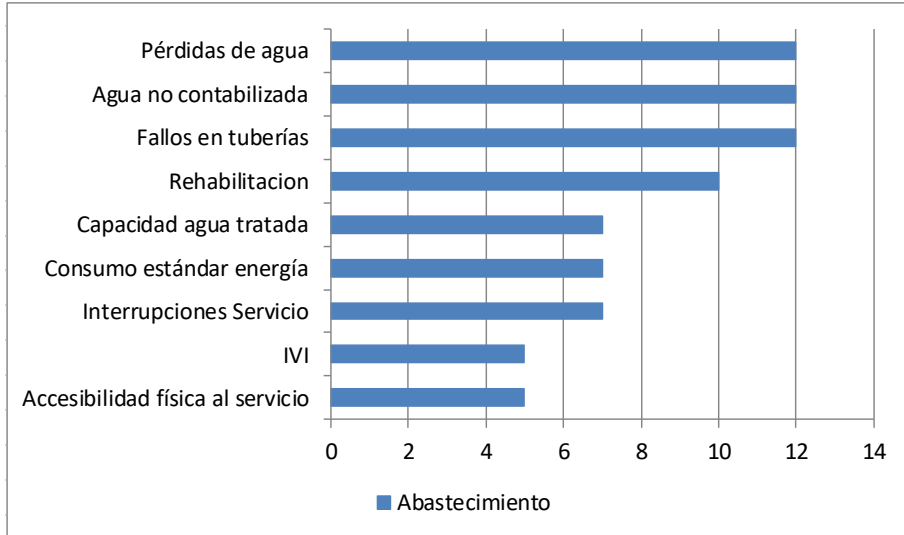


Figura 8: Principales métricas elegidas por las empresas de abastecimiento (Cardoso *et al.*, 2016b).

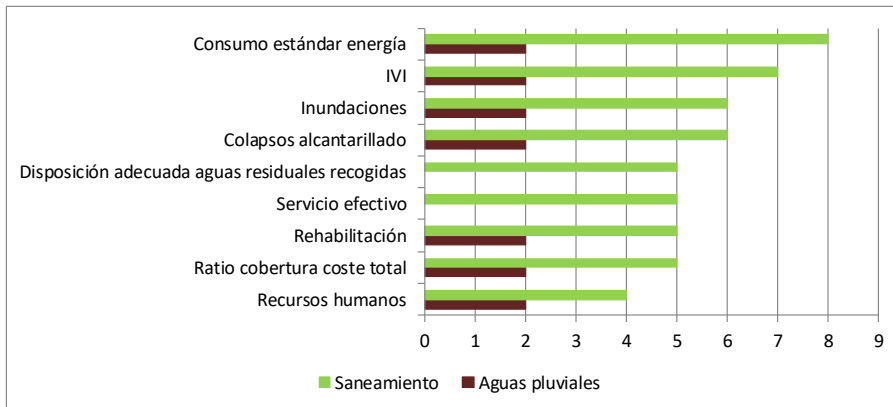


Figura 9: Principales métricas elegidas por las empresas de saneamiento y aguas pluviales (Cardoso *et al.*, 2016b).

De la primera gráfica se extrae que las empresas que gestionan sistemas de abastecimiento consideran la eficiencia hidráulica como una de sus principales preocupaciones, como demuestran los indicadores de “pérdidas de agua” y “agua no contabilizada”. También, la importancia a los indicadores de “fallos de tuberías” y “rehabilitación” demuestran interés de las empresas de abastecimiento por la sostenibilidad de sus infraestructuras.

Para los sistemas de saneamiento, las empresas consideran importante prestar atención a las métricas “colapsos de alcantarillados”, “inundaciones” e “IVI”, lo que demuestra que sus principales preocupaciones están relacionadas con el servicio efectivo, el consumo de energía y la sostenibilidad de la infraestructura.

Por último, para las redes de aguas pluviales, las métricas definidas fueron más dispersas, variando entre la sostenibilidad de la infraestructura (“IVI”, “colapso de alcantarillados”), aspectos financieros (“ratio de cobertura del coste total”), sociales (“inundación”) o sostenibilidad de la organización (“recursos humanos”).

Finalmente, se presentan dos ratios más para la evaluación de la infraestructura:

- *“Inversiones por habitante”*, obtenible tras dividir el coste de reposición de las infraestructuras (valor a nuevo o de la inversión necesaria) entre el número de clientes del área servida.
- *“Patrimonio por cliente”*, obtenible tras dividir el coste del valor actual de las infraestructuras entre el número de clientes del área servida.

2.2.4.1. Resumen

En este apartado se han revisado los principales indicadores existentes en la literatura y que permiten evaluar la gestión llevada a cabo sobre el sistema. De éste se extrae la importancia de establecer un cuadro de mando con indicadores del estado global de la red que permitan establecer objetivos para las políticas de GPI. Además, esos objetivos deben cumplir el paradigma “MARTE” asociado al ciclo de

mejora continua: el objetivo debe ser específico (entendible, no ambiguo), medible (objetivo claro y cuantificable, que se puede medir), alcanzable (se refiere a un concepto sobre el que se puede actuar), realista (se dispone de los recursos necesarios) y temporalizado (se fija un horizonte temporal para la consecución del objetivo).

Seguidamente, la entidad gestora debe definir criterios de evaluación, medidas de desempeño y metas para cada objetivo estratégico, de modo que sea posible la evaluación concreta de su cumplimiento.

Por otro lado, de la literatura se ha extraído un conjunto de indicadores del estado de la red, así como sus rangos de valoración que determinan su nivel de desempeño. Si se analiza la frecuencia de aparición de los indicadores en los artículos revisados, se puede realizar una clasificación de dichas métricas en función de su utilización o frecuencia de empleo. El resultado de este análisis se muestra en la Tabla 15, dejando constancia, además, del lugar de aplicación de cada indicador.

De su observación se concluye que el indicador más empleado en la literatura es el IVI, lo que demuestra un interés importante por la sostenibilidad de las infraestructuras. Indicadores económicos de coste de inversión y operacionales, así como los relacionados con el rendimiento de la red (presión y pérdidas de agua) son, igualmente, relevantes.

No obstante, hay que introducir la cautela de que, en el ámbito de investigación en indicadores del estado de redes de agua, la mayoría de autores proceden de la misma "familia portuguesa". Es por ello que las métricas más encontradas en la literatura son las propias que ellos mismos introdujeron y desarrollaron, pues son las que ellos mismos citan.

Tabla 15: Clasificación de los indicadores de evaluación del estado de la red según frecuencia de aparición en la literatura

Indicador	Alegre <i>et al.</i> (2013)	Alegre y Coelho (2013)	Cardoso <i>et al.</i> (2016a)	Cardoso <i>et al.</i> (2016b)	Ferreira y Carriço (2017)	Francisque <i>et al.</i> (2017)	Marques <i>et al.</i> (2012)	Metelka y Svitak (2010)	Lugar de aplicación
AC	✓	✓					✓		SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
ANC				✓	✓				Proyecto iGPI; Lisboa (Portugal)
AS			✓						Águas de Coimbra; SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
C_{int}	✓	✓		✓			✓		Proyecto iGPI; SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
C_{op}					✓				Lisboa (Portugal)
Dem_{NS}	✓	✓							-
Edad								✓	Františkovy Lázně (República Checa)
EDC							✓		SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
FC				✓	✓				Proyecto iGPI; Lisboa (Portugal)
IFC				✓	✓				Proyecto iGPI; Lisboa (Portugal)
IFT				✓	✓				Proyecto iGPI; Lisboa (Portugal)
IV						✓			Kelowna (Canadá)
IVI	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	Lisboa; Proyecto iGPI; Águas de Coimbra; SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
P_{min}	✓	✓					✓	✓	SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
P_{min}^*	✓	✓					✓	✓	SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
PPSR					✓				Lisboa (Portugal)
QT					✓				Lisboa (Portugal)
RIS							✓		SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
RL	✓	✓		✓	✓		✓		Lisboa; Proyecto iGPI; SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
RR			✓	✓	✓				Lisboa; Proyecto iGPI; Águas de Coimbra; SMAS Oeiras y Amadora (Portugal)
TF				✓	✓				Proyecto iGPI; Lisboa (Portugal)
UIRH					✓				Lisboa (Portugal)

2.3. Metodologías de agrupación

El tercer grupo de metodologías analizadas en la literatura hace referencia a las metodologías de agrupación y reposición simultánea de elementos de la red en base a criterios de adyacencia u oportunidad.

Como hemos visto en los dos apartados anteriores, la mayoría de los trabajos existentes en la literatura sobre la gestión de activos de redes de agua abordan el desarrollo de estrategias y la planificación de actividades de mantenimiento para tuberías individuales. Estos trabajos pueden distinguirse en dos enfoques distintos.

No obstante, las compañías de agua planifican y ejecutan programas de intervención desarrollados y elaborados, en los que un grupo de tuberías adyacentes se agregan de forma coherente para ser sustituidas simultáneamente. Como propone Bouvard *et al.* (2011), los ejemplos existentes que abordan este tema pueden clasificarse en dos grandes categorías: metodologías de agrupación estáticas y dinámicas. A su vez, se pueden distinguir dos tipos diferentes de técnicas de agrupación dinámica. Esto puede verse en la Figura 10, que representa las estrategias de sustitución existentes y cómo pueden conducir a las metodologías de agrupación mencionadas.

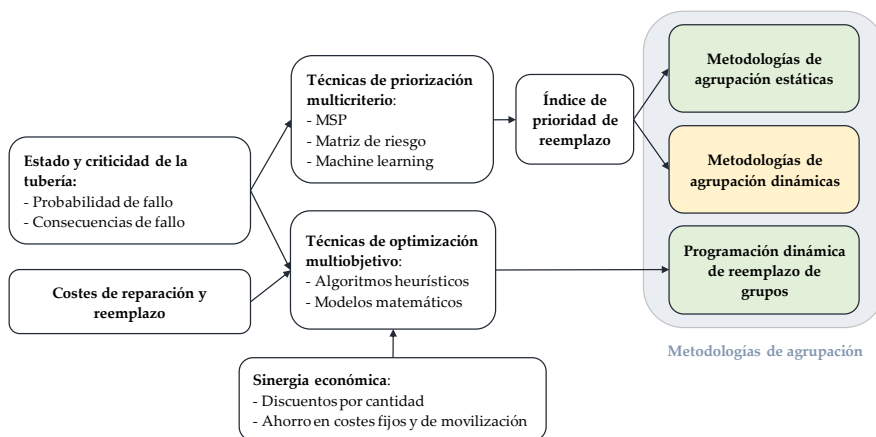


Figura 10: Estrategias de reemplazo y metodologías de agrupación.

En primer lugar, en las metodologías de agrupación estática (que se corresponden con el primer recuadro verde de la Figura 10), un conjunto de elementos de la red, como tuberías, se agregan en grupos predefinidos que serán sustituidos en la misma obra, es decir, se consideran para su reemplazo como un grupo indivisible. Estos

criterios de agrupación pueden ser geográficos, como tramos de calles entre intersecciones, o topológicos, como tramos de red entre válvulas o pozos. Independientemente de las estrategias de gestión de activos que se apliquen o de las actividades de mantenimiento que se programen, estas agrupaciones son unidades de reposición indivisibles e inalterables. Además, cada unidad operativa unificada tiene asignado un índice de prioridad de reposición en función de los activos de la red que contiene.

Como ejemplo, Elsawah *et al.* (2014) definen las unidades potenciales de reposición como el conjunto de tramos de red de abastecimiento, saneamiento y pavimento que comparten un mismo tramo de calle y que se encuentran entre las dos intersecciones más cercanas. Para priorizar las actividades de mantenimiento, desarrollaron un modelo basado en un índice de criticidad global para el tramo. Este enfoque optimiza la asignación del presupuesto y la utilización de los recursos y se aplica a un barrio de la ciudad de Montreal (Canadá). Más recientemente, los mismos autores incorporaron un sistema de ponderación dinámica para calcular el índice de criticidad global considerando únicamente las redes de agua y alcantarillado (Elsawah *et al.*, 2016).

Otro ejemplo estático interesante es el presentado por Tscheikner-Gratl *et al.* (2016a). Los autores priorizan la rehabilitación de tramos enteros de calles (incluyendo las redes de carreteras, de suministro de agua y de saneamiento). Según los autores, un tramo de calle está formado por entre de válvulas o pozos de registro con un determinado umbral de longitud para evitar tramos demasiado largos. El modelo calcula un índice de prioridad total y ordena los tramos de calle para su rehabilitación. El procedimiento se aplica a un estudio de caso de una ciudad austriaca de 130.000 habitantes y para un horizonte de 6 años.

Por otro lado, los modelos de agrupación dinámica agregan elementos individuales de la infraestructura según avanza la metodología. Como ya se ha mencionado, dentro de los métodos de agrupación dinámica se distinguen otros dos tipos. Por un lado, las unidades de obra unificadas derivadas de los métodos de agrupación

estática pueden agregarse en programas de intervención más desarrollados y realistas según criterios de similitud o proximidad. Por tanto, esta técnica puede considerarse una mejora de la estática. Este enfoque, que aún no se ha estudiado en la literatura, se resalta en amarillo en la Figura 10 y es la que se propondrá seguidamente en este trabajo.

En cambio, el segundo enfoque dinámico organiza los elementos de red de manera que se potencien posibles reducciones de costes si éstos se sustituyen simultáneamente. Por lo tanto, para promover la integración de tuberías individuales en programas de trabajo unificados, se requieren algoritmos de optimización y es necesario incluir funciones objetivo como la minimización de costes o la maximización de la longitud sustituida. En general, esta metodología produce obras y las programa para su ejecución de forma que se minimicen los costes globales de mantenimiento durante un periodo de planificación determinado. A diferencia del método de agrupación estática, las agregaciones que se forman no son indivisibles ni definitivas y cambian dentro del proceso de optimización según el algoritmo, los objetivos y las restricciones implementadas. Esta metodología puede distinguirse en el segundo recuadro verde de la Figura 10.

Dentro de este enfoque, el primer modelo encontrado fue desarrollado por Nafi y Kleiner (2010). Los autores proponen tres tipos diferentes de economías de escala para fomentar la agregación de varias tuberías en proyectos de sustitución e implementan un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) para minimizar el coste total y maximizar el presupuesto disponible gastado. Este modelo se aplicó a una red de distribución de agua de muestra de 152 tuberías y 18 km de longitud. Otros trabajos de los mismos autores incorporan consideraciones de deterioro teniendo en cuenta los costes del ciclo de vida (Kleiner *et al.*, 2010).

Otro método dinámico de programación fue desarrollado por Li *et al.* (2011), que proponen un modelo de optimización para agrupar activos de red que (1) sean geográficamente adyacentes, (2) requieran la misma maquinaria de reposición y (3) con similares áreas de interrupción de clientes. Este modelo tiene en cuenta los costes

fijos de maquinaria y desplazamiento que pueden ahorrarse si varias tuberías forman parte de una misma obra. Este modelo requiere predefinir el número máximo permitido de tuberías en un grupo. Seguidamente, los autores implementan un algoritmo genético modificado (MOGA) para encontrar la opción de agrupación que minimice los costes totales de sustitución y reparación. En un trabajo más reciente, Li *et al.* (2016) incorporaron nuevos modelos de costes e interrupción del servicio y aplicaron un algoritmo genético de ordenación no dominante (NSGA-II) para minimizar los costes totales y la interrupción del servicio.

Rokstad y Ugarelli (2015) también tienen en cuenta los beneficios económicos de las economías de escala y demuestran que agrupar la renovación de las tuberías de agua adyacentes es más rentable. Además, los autores definen la unidad funcional como el conjunto de tramos de red entre dos válvulas. En la línea de Nafi y Kleiner (2010) y Li *et al.* (2011), este trabajo incluye un coste de obra fijo que puede compartirse cuando se renuevan varios elementos juntos. Para limitar la longitud total de la tubería que se renueva simultáneamente, los autores introducen un número máximo de tramos de red a renovar conjuntamente. Finalmente, se implementa una heurística para encontrar soluciones óptimas locales y se aplica a un caso de estudio en una ciudad noruega de tamaño medio con 26.000 habitantes y 120 km de red.

Otro ejemplo es el de Carey y Lueke (2013), que proponen una reducción general de costes del 10% y el 20% en caso de contigüidad y armonización de las obras de la infraestructura con otros proyectos de renovación del pavimento, respectivamente. Su modelo evalúa cada tramo de la red con una puntuación de criticidad, y un algoritmo evolutivo minimiza la puntuación de criticidad media anual a lo largo del horizonte de planificación.

Un modelo similar se aplicó a la red de distribución de Fairfield, compuesta por 54 km de tuberías de agua, que suministra agua a una población de 15.000 personas en Ontario, Canadá (Roshani y Fillion, 2014). Los autores también introducen descuentos por cantidad en función de la longitud sustituida, y descuentos por

adyacencia que benefician la sincronización de varios proyectos municipales de mantenimiento. Se aplica un NSGA-II para minimizar los costes totales.

Además, Kerwin y Adey (2020) también incluyen un factor de coordinación para beneficiar la sincronización de diversas intervenciones de infraestructura, por ejemplo, la red de carreteras, de gas o de electricidad. Se aplica una optimización binaria mediante el método Simplex con la técnica *branch and bound* para maximizar el beneficio neto. Aplicaron su metodología a una pequeña red de 4.6 km y 234 tuberías.

Kielhauser *et al.* (2016) describen una metodología elaborada de dos módulos que combina técnicas estáticas y dinámicas. En el primer módulo, denominado cálculo de vecindad estático, cada activo de la red se asocia a una celda cuadrada predefinida de la red y sus celdas adyacentes forman su vecindad. El segundo, ejecutado dinámicamente dentro de la metodología, obtiene la vecindad del activo en función de la topología de la red, para los elementos pertenecientes a la misma infraestructura, y determina las celdas de Voronoi para los objetos de diferentes sistemas. Esta segunda etapa requiere la definición de dos entradas: la distancia máxima en la que dos objetos podrían agruparse en un grupo de intervención y el número mínimo de objetos que forman un grupo de intervención. Cada grupo de intervención se compone, como mínimo, de un elemento con necesidades urgentes de sustitución y de otros elementos cuyo estado, aunque no sea crítico, justifica su inclusión en el mismo proyecto de mantenimiento. A continuación, los grupos de intervención se añaden de uno en uno a la obra, empezando por el más urgente, hasta que el presupuesto disponible esté completamente asignado. Esta metodología se utiliza en una ciudad con una población de 30.000 habitantes y cinco redes de infraestructuras (electricidad, gas, carreteras, abastecimiento y saneamiento).

Por último, Kielhauser y Adey (2018) aplican su cálculo dinámico de vecindad previamente desarrollado (Kielhauser *et al.*, 2016), añadiendo un algoritmo genético para encontrar la combinación económicamente óptima a la vez que incluyen consideraciones sobre los costes de intervención, la pérdida de servicio, los

descuentos en las intervenciones de redes simultáneas y el impacto potencial de las intervenciones en las infraestructuras adyacentes. En este último trabajo no se presenta ningún caso de estudio.

2.4. Ejemplos de aplicación de metodologías GPI en empresas del sector

De momento, este capítulo ha revisado trabajos que implementan técnicas de priorización de alternativas de inversión y otros que desarrollan y revisan indicadores del nivel de desempeño de la red.

La aplicación conjunta de ambos procedimientos forma lo que se conocen como sistemas de ayuda a la toma de decisiones (*decision support systems* o DSS). Se trata de sistemas que, apoyados en una serie de indicadores, combinan inteligentemente los datos, modelos y herramientas para responder a la pregunta de qué presupuesto o nivel de inversión es necesario para conseguir el rendimiento deseado dichas métricas.

Una de estas metodologías más consolidadas es el modelo AWARE-P, presentado anteriormente en el primer capítulo de este trabajo, y que ha servido de marco para elaborar varios planes tácticos en Portugal. Este es el caso de Marques *et al.* (2012) y Carriço *et al.* (2013), que desarrollan planificaciones tácticas a cinco y veinte años para una red de agua en el área del distrito de Lisboa y una planta de tratamiento de agua. Asimismo, Cardoso *et al.* (2016a) resumieron la aplicación de AWARE-P por parte de catorce empresas de aguas residuales de Portugal. En estos tres trabajos, los autores comparan y seleccionan la mejor solución de intervención para la red entre un conjunto de alternativas, de las cuales una de ellas es la situación de *status quo* (sin coste de inversión, sólo reparaciones tras rotura). Para evaluar estas alternativas, se consideraron diferentes escenarios de demanda y condiciones meteorológicas y se evaluaron diversas métricas de riesgo, rendimiento y coste.

Un trabajo similar aborda un análisis de sostenibilidad a largo plazo para la red de saneamiento de Trondheim, Noruega (Beheshti y Sægrov, 2018). En este caso, los diversos escenarios vienen dados por factores de riesgo como el crecimiento de la población o el cambio climático y sus posibles combinaciones, mientras que las estrategias de intervención son más generales, como aumentar la tasa de rehabilitación o ampliar la longitud del sistema.

Estos trabajos, si bien son interesantes ya que integran numerosas y diversas métricas, no abordan la sustitución de las tuberías de la red, sino que evalúan soluciones de intervención como la ampliación de la red (Carrico *et al.*, 2013) o la construcción de una estación de bombeo (Cardoso *et al.*, 2016a).

En cambio, Ferreira y Carrico (2019) se centran en la sustitución de las tuberías de las redes de abastecimiento y saneamiento, donde las alternativas corresponden a diferentes escenarios de estrategia de inversión. En este caso, los autores eligen las tasas de rehabilitación y renovación (entre tres opciones) que mejor se adaptan a un conjunto de objetivos tácticos como lograr un valor IVI adecuado o reducir el consumo de energía y las pérdidas de agua en la sexagenaria red de distribución de agua de Lisboa. Sin embargo, este enfoque carece de sofisticación, ya que no puede garantizar la obtención de la mejor solución, dado que puede no estar entre el conjunto de alternativas de inversión discretas predefinidas.

Como alternativa, otros trabajos definen las inversiones necesarias para que la infraestructura cumpla determinados objetivos estratégicos. Por ejemplo, Large *et al.* (2015) planifican las necesidades de inversión a largo plazo de la mayor empresa de agua de Francia. Se consideran dos horizontes a largo plazo (50 y 100 años) y, a través de una función de supervivencia, se estima el importe de inversión anual para garantizar que todas las tuberías estén en servicio al final de ambos plazos. Dado el fuerte impacto de la tasa de descuento en el largo plazo, se evalúan tres escenarios diferentes para este parámetro. De forma similar, Urrea-Mallebrera *et al.* (2019) estiman las necesidades futuras de inversión para garantizar la sostenibilidad de dos activos de infraestructuras hidráulicas (una presa y un canal) de la cuenca del Segura

en España a través de dos índices: el IVI y el ASI (índice de sostenibilidad de los activos), basado este último en las actividades de mantenimiento pasadas.

No obstante, a la hora de definir estrategias de inversión, y especialmente a largo plazo, puede ser necesario el uso de más de una o dos únicas métricas. En este sentido, Brito *et al.* (2020) utilizan tres indicadores para planificar las necesidades de inversión de un gran sistema de riego de Portugal a corto, medio y largo plazo: el IVI, la tasa de rehabilitación anual y el ratio de activos en servicio. Una vez más, las decisiones fueron apoyadas por el software AWARE-P.

Por último, dos trabajos recientes e interesantes se basan exclusivamente en el IVI para definir planificaciones estratégicas a largo plazo. Cabral *et al.* (2019) evalúan este KPI en una pequeña empresa de servicios públicos de la región del Algarve (Portugal) para tres estrategias de intervención: (1) no realizar ninguna rehabilitación o *status quo*, (2) sustituir los activos de infraestructura al final de su vida útil y 3) mantener un valor global del IVI de 0.5. Dado que esta métrica depende en gran medida de la estimación de la vida útil, los autores llevaron a cabo un análisis de sensibilidad de este parámetro con tres escenarios diferentes. Un trabajo posterior incorporó un enfoque estocástico para tratar las incertidumbres en las estrategias de inversión (Vieira *et al.*, 2020).

Un resumen comparativo de las principales metodologías GPI identificadas en la literatura se recoge en la Tabla 16.

Tabla 16: Comparación de las principales metodologías GPI identificadas.

Referencia	Prioridad reemplazo	KPIs	Agrup./ adyac.	Ámbito de planificación	Metodología
<i>Marques et al. (2012)</i>	Matriz de riesgo	Rendimiento, riesgo y coste	No	Red pequeña, 5 años	AWARE-P. Selección de entre alternativas predefinidas
<i>Zayed y Mohamed (2013)</i>	MSP	Tasa de rotura, estado de la tubería	No	Red pequeña, 3 años	Selección de entre alternativas predefinidas

Referencia	Prioridad reemplazo	KPIs	Agrup./ adyac.	Ámbito de planificación	Metodología
<i>Carriço et al. (2013)</i>	ELECTRE III	Rendimiento, riesgo y coste	No	Instalación específica	AWARE-P. Selección de entre alternativas predefinidas
<i>Cardoso et al. (2016a)</i>	Matriz de riesgo	Rendimiento, riesgo y coste	No	Red pequeña, 20 años	AWARE-P. Selección de alternativas predefinidas
<i>Ferreira y Carriço (2019)</i>	N/A	Rendimiento, riesgo y coste	No	Red pequeña, 15 años	AWARE-P. Selección de entre alternativas predefinidas
<i>Urrea-Mallebrera et al. (2019)</i>	IVI, ASI	IVI, ASI	No	Red pequeña, 20 años	Análisis agregado de la red
<i>Cabral et al. (2019)</i>	Porcentaje de vida residual	IVI	No	Red pequeña, 35 años	Selección de entre alternativas predefinidas
<i>Brito et al. (2020)</i>	N/A	IVI, tasa anual de rehab., vida útil	No	Red extensa, hasta 70 años	AWARE-P. Selección de entre alternativas predefinidas
<i>Vieira et al. (2020)</i>	N/A	IVI	No	Red pequeña, 20 años	Selección de entre alternativas predefinidas

2.5. Conclusiones extraídas de la revisión de la literatura

Tras esta exhaustiva revisión y análisis crítico de la literatura existente, se han detectado varias carencias. A continuación, se indican las principales identificadas y las propuestas que presenta la metodología desarrollada en esta tesis para solventarlas:

- Respecto a las estrategias de sustitución existentes, un enfoque ampliamente utilizado en la literatura propone un conjunto de alternativas discretas, de las cuales se elige la más adecuada (Beheshti y Sægrov, 2018; Cardoso *et al.*, 2016a; Carriço *et al.*, 2013; Ferreira y Carriço, 2019; Marques *et al.*, 2012). Sin embargo, esta perspectiva no es fácilmente aplicable a cualquier otra empresa. Así, es necesario una metodología más versátil y práctica que trate de estimar las inversiones necesarias para cumplir con ciertos objetivos

estratégicos preestablecidos.

- A la hora de elaborar la planificación de inversiones a largo plazo, la mayoría de los trabajos revisados en la literatura (Brito *et al.*, 2020; Cabral *et al.*, 2019; Ferreira y Carriço, 2019; Large *et al.*, 2015), así como las metodologías GPI más utilizadas y los software comerciales, como AWARE-P, prescinden de los criterios relacionados con la adyacencia entre elementos y la conveniencia de su reposición en el mismo momento. En su lugar, estiman y planifican las necesidades de inversión sobre la base de tuberías individuales. Sin embargo, este enfoque no se ajusta a las políticas reales de sustitución de las empresas de agua, ya que éstas realizan las actividades de sustitución sobre agregaciones coherentes de tuberías vecinas. Resulta más práctica la consideración de elementos urbanos, como tramos de calle, como elementos operacionales de sustitución.
- Del mismo modo, no se han abordado previamente las restricciones en las asignaciones presupuestarias por criterios sociales y geográficos. Sin embargo, estos criterios de distribución son esenciales para garantizar una distribución justa del importe de la inversión entre los distritos y las ciudades. Su inclusión no es solo relevante producir estrategias de intervención reales y prácticas, sino porque su no consideración puede ser engañosa, ya que puede dar lugar a estimaciones insuficientes de las necesidades de inversión y a condiciones futuras irreversibles.
- Por otro lado, algunos trabajos recientes proponen estrategias de intervención variadas y prácticas, pero, si bien son minuciosos y están bien fundamentados, ponen de manifiesto la fuerte dependencia de los trabajos existentes del IVI (Cabral *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020). Sin embargo, este indicador, aunque sencillo y potente, no es del todo fiable. Esto se debe a su fuerte dependencia de la estimación de la vida útil del activo, con un alto grado de incertidumbre. Esto es especialmente cierto en el caso de horizontes de planificación amplios, ya que se instalan nuevos materiales

cuyo comportamiento a largo plazo se desconoce (ya que no existen datos sobre la experiencia de uso anterior). Por lo tanto, la vida útil de estos nuevos activos sólo puede estimarse de forma aproximada, para garantizar una estimación global y precisa del estado de la infraestructura. Algo similar ocurre con los trabajos de Large *et al.* (2015) y Urrea-Mallebrera *et al.* (2019), que emplean un solo indicador cada uno. Así, es necesario una combinación de un conjunto más numeroso y diverso de métricas.

- En cuanto a las técnicas de agrupación de elementos de la red, la primera conclusión que puede extraerse es que la agregación de tuberías individuales no sólo en obras de renovación factibles, sino eficientes, no es una tarea sencilla. Esto es especialmente cierto cuando hay que tener en cuenta múltiples criterios, como la prioridad de la sustitución y las limitaciones presupuestarias.
- En cuanto a las metodologías de agrupación estática, los modelos revisados definen las unidades de reposición basándose únicamente en criterios geográficos o topológicos, como segmentos de calles entre intersecciones, pero no se considera ninguna agregación posterior de estas unidades de reposición en configuraciones de trabajo más estructuradas y cercanas a la realidad. Por tanto, este enfoque no es sofisticado y carece de base técnica.
- Con respecto al enfoque de agrupación dinámica, el primer tipo de metodología propone un enriquecimiento de la estática, ya que agrega las unidades de reposición unificadas en programas de trabajo más elaborados y prácticos. Sin embargo, este enfoque no se ha estudiado hasta ahora. En cambio, el segundo tipo se basa exclusivamente en la ventaja económica que supone la sustitución simultánea de varias tuberías contiguas. En otras palabras, promueve la agregación de tuberías mediante la inclusión de descuentos por cantidad en los grandes proyectos de sustitución y el ahorro en los costes de preparación y movilización de la obra. Sin embargo, este enfoque requiere la estimación previa de ambos valores. Estas estimaciones

suelen basarse en la experiencia e inevitablemente incorporan un cierto grado de subjetividad en el análisis. Con respecto a los criterios adicionales, solo Kielhauser *et al.* (2016) incluyen consideraciones sobre el estado y las necesidades de sustitución para agrupar los objetos en programas de intervención.

- Estos modelos dinámicos suelen proporcionar una solución económicamente eficiente, pero ofrecen una versatilidad limitada, ya que ofrece un bajo nivel de configurabilidad operativa. En la bibliografía revisada, solo se han identificado unos pocos parámetros de configuración: el número máximo admisible de tuberías que podrían agruparse en un grupo de intervención (Li *et al.*, 2011; Rokstad y Ugarelli, 2015), la distancia máxima a través de la cual podrían agruparse dos objetos y el número mínimo de objetos que forman un grupo de intervención (Kielhauser *et al.*, 2016).
- Por otro lado, la mayoría de los modelos dinámicos estudiados consideran las tuberías como las unidades de sustitución más pequeñas. Dado que las tuberías pueden no estar en consonancia con el trazado de la calle, estos enfoques se centran en el análisis y las técnicas matemáticas, más que en la solución de problemas reales (Dekker, 1996). Sin embargo, las empresas de agua planifican y realizan las intervenciones de sustitución en función de la topografía de la calle y las calles completas o los tramos de calle representan las unidades de sustitución más pequeñas. Por lo tanto, sigue faltando una perspectiva más práctica, realista y útil dentro de los modelos dinámicos.
- Además, casi todos los trabajos revisados aplican sus modelos a redes de pequeño tamaño o de muestra (Kerwin y Adey, 2020; Kielhauser y Adey, 2018; Kleiner *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Nafi y Kleiner, 2010; Roshani y Fillion, 2014). Esto es comprensible ya que los modelos dinámicos requieren una gran capacidad de procesamiento y un tiempo de cálculo considerable. A medida que aumentan el tamaño y la complejidad de la red, también crece

la posibilidad de que estos modelos sean inviables y poco prácticos. Este problema puede poner en peligro la viabilidad de estos modelos cuando se aplican a empresas reales de suministro de agua que dan servicio a ciudades de tamaño medio o grande y gestionan redes muy desarrolladas y complejas.

Una vez identificadas todas estas oportunidades de mejora, el siguiente apartado introduce la metodología que propone este trabajo, indicando las incorporaciones que ésta presenta para superar las carencias identificadas en la literatura.

2.6. Propuesta de actuación

Esta sección introduce la metodología GPI desarrollada en este trabajo y que sirve para ayudar en la toma de decisiones y planificar eficazmente las necesidades de inversión en una red de abastecimiento y saneamiento. Cabe decir que el enfoque se corresponde con el segundo de los identificados en la literatura: el establecimiento de una prioridad de sustitución para cada activo de la red y la posterior definición y seguimiento de los KPI. La metodología consta de cinco pasos, como se muestra en la Figura 11.

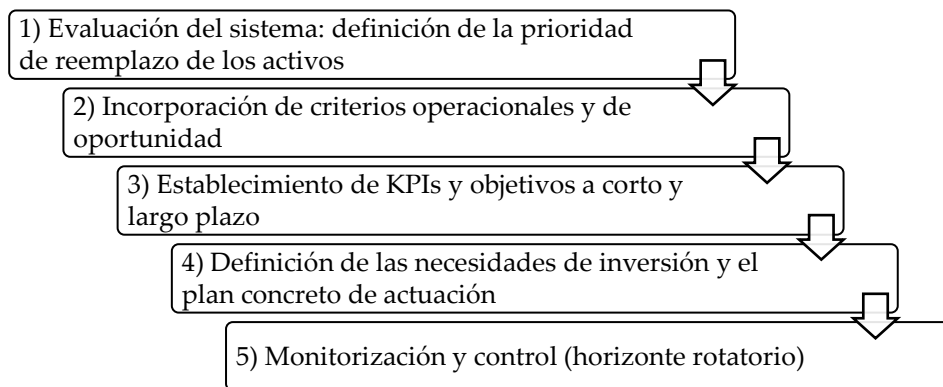


Figura 11: Metodología propuesta de gestión patrimonial de infraestructuras (GPI).

El primer paso de esta metodología es determinar la prioridad de sustitución de cada elemento de la red. Es necesario calibrar el equilibrio entre el estado de una tubería y su criticidad. Esto ayuda a responder a preguntas como si es más urgente sustituir una tubería que tiene una alta probabilidad de fallo u otra con una probabilidad menor pero que abastece a un cliente relevante, como un hospital. Para ello, se definirá un índice o puntuación que mida la prioridad de sustitución para cada activo de la red, utilizando el modelo de sumas ponderadas (MSP). El desarrollo de este índice se describe en el capítulo 3 del documento.

Una vez clasificado cada tubería de la red para su sustitución, se introducen en la metodología criterios operativos y de conveniencia. En cuanto al primer criterio, deben integrarse las consideraciones de adyacencia y agrupación. En ocasiones, puede ser conveniente sustituir simultáneamente dos tuberías adyacentes, aunque una de ellas tenga una prioridad de sustitución menor, que dos tuberías alejadas entre sí.

Para abordar esta problemática, la metodología propuesta en esta tesis presenta un enfoque técnico y operativo que agrupa los elementos de la red en función de sus necesidades de reemplazo. En otras palabras, si es necesario sustituir una tubería deteriorada, hay que considerar simultáneamente otras tuberías adyacentes que quizá no necesiten una sustitución urgente todavía, pero que lo harán en el futuro.

También, la metodología desarrollada ofrece un alto grado de configurabilidad operativa que permite que las configuraciones de obra y los diseños resultantes cumplan con los criterios operativos de la empresa de agua. Es decir, aunque los resultados se fundamenten siempre en criterios técnicos, ésta permite integrar los conocimientos y la experiencia tradicionales de las empresas de agua.

En tercer lugar, ésta integra un algoritmo en dos fases que aporta versatilidad y flexibilidad. Además, la política estratégica de la empresa de aguas se integra en el proceso de optimización mediante una innovadora función multiobjetivo. Esta

función permite integrar los criterios de la empresa a través de un conjunto de ponderaciones, lo que la hace versátil y aplicable a cualquier empresa de aguas.

En cuarto lugar, en esta metodología los tramos de calle son las unidades de reemplazo más pequeñas posibles. Estos elementos funcionales son propensos a formar parte de una intervención viable y coherente, ya que están en armonía con los criterios operativos reales y prácticos de la empresa de aguas.

Por último, la metodología puede aplicarse a las grandes empresas de agua y a las redes más amplias y complejas. De hecho, como se verá más adelante, ésta ha sido aplicada sin problemas a una gran empresa de agua en España, que da servicio a un área metropolitana con más de un millón de habitantes, con una red de más de 230.000 tuberías y casi 7.000 km.

Otros aspectos, aparte de los de adyacencia y reemplazo simultáneo, son los de conveniencia u oportunidad. Las empresas de agua suelen ser organismos públicos y no pueden planificar sus necesidades de inversión basándose exclusivamente en criterios técnicos o económicos. Por lo general, se tienen en cuenta restricciones de distribución presupuestaria predefinidas entre tipos de infraestructuras, por ejemplo, abastecimiento y saneamiento, o municipios.

La inclusión de estos criterios, si bien contribuye a una solución más práctica y realista, no está alineada con la solución técnica, incurriendo en mayores esfuerzos de inversión que los exclusivamente necesarios desde un punto de vista puramente técnico o económico. Sin embargo, a pesar de su impacto, estos factores no han sido habitualmente tratados en la literatura. La mayoría de los trabajos revisados definen sus necesidades de inversión en función de las tuberías individuales de la red y sin restricciones de asignación presupuestaria no técnicas, lo que puede llevar a subestimar las necesidades de inversión. Estos factores sí son tenidos en cuenta en la metodología propuesta.

El tercer paso consiste en definir indicadores y métricas para evaluar la infraestructura. Éstas deben abarcar tres áreas fundamentales: el estado de la red, la calidad proporcionada y el rendimiento económico. Para cada KPI y un horizonte temporal determinado, se fijan unos valores objetivo. Estos objetivos, que deben ser específicos, medibles, alcanzables y realistas, son un reflejo cuantitativo de la estrategia y la política de la empresa hacia sus clientes y la sociedad en general. En esta metodología, se emplea una combinación de los cuatro indicadores siguientes: el IVI, la probabilidad media de fallo, el índice medio de riesgo y la edad media de la red. Estos KPI se han seleccionado porque, además de que su cálculo e interpretación son sencillos e inequívocos, pueden proporcionar información completa y diversa sobre el rendimiento de la red. Además, el Índice de Riesgo medio de la red se introduce originalmente en este trabajo como una métrica novedosa que integra todos los factores relevantes en el proceso de toma de decisiones.

Conocido el rendimiento del sistema y establecidos los objetivos, el cuarto paso requiere la elaboración de un plan de inversiones a largo plazo para alcanzar dichos objetivos. Ya que el recurso económico es siempre limitado, la estrategia de inversión debe ser lo más eficiente posible. Para ello, se usa la técnica de bisección matemática, que puede ayudar a reducir considerablemente el tiempo y el esfuerzo de cálculo.

En este paso también se determina el plan de actuación concreto, es decir, los tramos de calle en los que se va a intervenir y su fecha de ejecución. Para ello, es de gran utilidad el uso de herramientas de visualización como un sistema de información geográfica (SIG). Además, es conveniente realizar análisis de sensibilidad sobre los parámetros con mayor incertidumbre. Esto consiste en simular diferentes escenarios futuros para variables influyentes como los posibles niveles de demanda (Carriço *et al.*, 2013), las tasas de descuento (Large *et al.*, 2015) o la vida útil media de los activos (Cabral *et al.*, 2019) para determinar la robustez de las soluciones propuestas frente a posibles imprecisiones de los datos de entrada. Esto es especialmente relevante cuando se consideran horizontes temporales considerables a largo plazo

Finalmente, el último paso de la metodología es realizar un control y seguimiento adecuados del estado y rendimiento de la infraestructura a través de los KPI. Las consecuencias de invertir menos de lo necesario en tareas de mantenimiento pueden ser imperceptibles a corto plazo, pero pueden conducir a situaciones irreversibles a largo plazo. Por ello, es fundamental recoger datos anualmente, analizar su evolución y modificar la estrategia de inversión si es necesario. Este procedimiento se conoce como horizonte rodante y dota a la metodología de un enfoque iterativo.

3. PRIORIDAD DE REEMPLAZO: DESARROLLO DEL ÍNDICE DE RIESGO

La producción de un plan de inversiones sostenible en el marco de una metodología GPI requiere la programación en el tiempo, de la manera más adecuada posible, del reemplazo de tuberías. Para ello, es importante el diseño de alguna medida de la prioridad de reemplazo de los tramos de red combinando tanto su estado físico como las consecuencias de que se produzca una avería sobre éste. Este proceso se corresponde con el primer paso del esquema definido en la Figura 11.

La Figura 12 muestra esquemáticamente esta combinación de factores. El estado de una tubería es una medida de su propensión a romperse, mientras que las consecuencias del fallo cuantifican los resultados negativos derivados de esa rotura. Es necesario por tanto formular una combinación ponderada de ambos criterios, obteniendo la prioridad de reemplazo de cada tubería y permitiendo establecer planes de inversión fundamentados técnicamente.

Este capítulo se centra, por tanto, en dicho proceso de ponderación, que corresponde a la formulación de una función multicriterio para estimar el riesgo (probabilidad y consecuencia de fallo) asociado a cada tubería.

Este análisis tiene un marcado carácter cuantitativo, y está enfocado al ajuste para las tuberías de la red de una función Índice de Riesgo que dependa de los factores asociados al estado de la tubería y a las consecuencias del fallo. Para ello, se emplearán las metodologías de elección discreta (ED) y ajuste por regresión lineal múltiple (RLM), introducidas en el capítulo anterior (apartado 2.2.2).

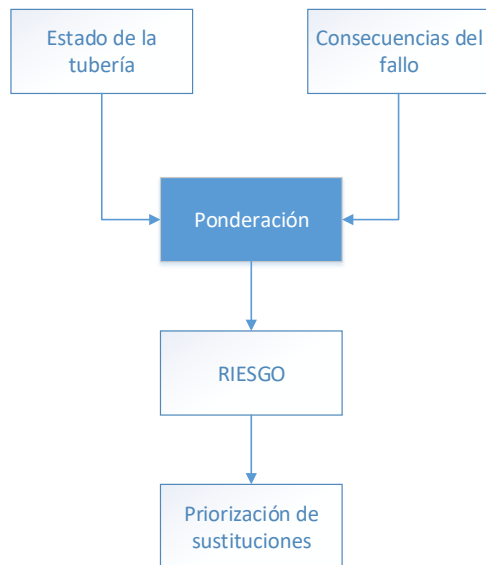


Figura 12: Combinación del estado de una tubería con las consecuencias derivadas de su fallo para determinar la priorización de reemplazos.

Ambas técnicas se basan en el uso de cuestionarios a través de los cuáles un grupo de expertos inducen sus conocimientos y preferencias a la hora de elegir o valorar ciertas alternativas de renovación de red, en función de su estado y criticidad. La resultado de la aplicación de estas técnicas son los valores de los pesos que multiplican a cada factor que influye en la función Índice de Riesgo y, por tanto, en la decisión de renovar un determinado tramo de red.

Los motivos por los que se ha decidido emplear estas técnicas son la facilidad para modelar las preferencias de los expertos y la simplicidad desde el punto de vista de los encuestados, contribuyendo a una extracción de la información más precisa de los cuestionarios.

Volviendo a la Figura 12, una correcta estimación de la probabilidad de fallo de un tramo de red es esencial para garantizar un buen estado del sistema. Sin embargo,

para una gestión eficiente de la infraestructura no basta con el conocimiento de dicha probabilidad de fallo ya que es necesaria la cuantificación de la importancia de que se realice una intervención sobre dicho tramo.

La cuantificación de la importancia de un tramo de red es necesaria ya que su criticidad puede ser muy relevante por las consecuencias provocadas por su rotura. Las consecuencias asociadas al impacto sobre el servicio o de los daños provocados por su fallo, son medidas fundamentales.

Bajo este contexto de simbiosis, surge la necesidad de desarrollar un “Índice de Riesgo”, que combine la probabilidad y la consecuencia y que ayude en la toma de decisiones para la gestión patrimonial de infraestructuras para lograr la sostenibilidad de la red y la optimización de los recursos.

Esta tarea se ha acometido de diversas maneras en trabajos académicos e industriales realizados previamente. Concretamente, en la literatura se han identificado los siguientes tipos de técnicas de decisión multicriterio: 1) matriz de riesgos, 2) modelo de sumas ponderadas (MSP), o *weighted sum model* (WSM) y las de *outranking*: ELECTRE y PROMETHEE.

Según los trabajos revisados, la técnica más empleada es el modelo de sumas ponderadas (MSP). Esta técnica consiste en asignar una nota numérica a cada alternativa de reposición, siendo esta puntuación la que determina el orden de reemplazo de los elementos de la red.

De entre las técnicas revisadas, MSP resulta de interés por los siguientes motivos:

- La puntuación asignada es perfectamente comparable de una alternativa a otra, permitiendo establecer claramente un orden de prioridad en su ejecución.
- Permite integrar en un modelo conceptos de probabilidad y consecuencias

de fallo, dirigiendo la prioridad de reposición por criterios relacionados con el riesgo de fallo de los tramos de red.

- Es una técnica más sencilla que las de *outranking* (ELECTRE y PROMETHEE), aunque igualmente eficaz y potente para priorizar alternativas de inversión.
- Se trata de una técnica más sofisticada que la matriz de riesgo, pues permite asignar una puntuación continua a cada alternativa. En cambio, la técnica de matriz de riesgo, al categorizar tuberías, asigna valores discretos del riesgo y no permite diferenciar con suficiente precisión entre las prioridades de dos tramos de red.

Así, la aplicación de la técnica MSP es la que resulta, a priori, más idónea. Por tanto, el Índice de Riesgo para cada tramo de red se define como un valor numérico formado por una suma ponderada de términos. Cada uno de los términos corresponde a la cuantificación de uno de los factores asociados al riesgo, mientras que las ponderaciones o pesos deberán ser posteriormente estimados para el conjunto de la red de tuberías. La formulación es la siguiente:

$$\text{Índice de riesgo}_i = \sum_j \beta_j \cdot f(x_{j,i}) \quad (6)$$

dónde $f(x_{j,i})$ es el valor que toma la función de la variable para el factor j para el tramo de red i , y β_j es el peso asociado al factor j . A continuación, se describen los factores que intervienen en el dicha expresión, asociados tanto a reflejar el estado de la tubería como a cuantificar las consecuencias su fallo.

3.1. Factores asociados al estado de la tubería

El principal factor de estado de la tubería con influencia en el Índice de Riesgo es la probabilidad estadística de fallo. Ésta, a su vez, depende del tipo de red a la que perteneciera la tubería, de su diámetro y de su material de composición, entre otros:

Probabilidad de fallo

Probabilidad estadística de ocurrencia de un fallo por cada 100 metros de tramo de red con determinadas características.

Tipo de red

Subred a la que pertenece un determinado tramo de red. Pueden ser: 1) red arterial y de transporte de abastecimiento, 2) red secundaria de abastecimiento, 3) red de colectores de saneamiento y 4) red secundaria de saneamiento.

Material

Material del que está fabricado un tramo de red:

- Red de abastecimiento: fibrocemento (FC_A), hierro fundido (HF_A), fundición dúctil (FD_A), hormigón armado con camisa de chapa (HACH_A), polietileno (PE_A) y cloruro de polivinilo (PVC_A).
- Red de saneamiento: hormigón en masa (HM_S), hormigón armado (HA_S), cloruro de polivinilo (PVC_S), fábrica de ladrillos (FL_S), gres (G_S), semigrés/gres antiguo (SG/GA_S), fundición dúctil (FD_S) y hormigón armado con polietileno (HAPE_S).

Diámetro

Longitud de la circunferencia interna del tramo de red.

3.2. Factores asociados a las consecuencias del fallo

Además de los que definen el estado de la tubería, el otro tipo de factores que influyen en el Índice de Riesgo son los asociados a las consecuencias derivadas del fallo de la misma. Se trata de factores que de alguna manera cuantifiquen el impacto social, económico, técnico o estratégico que puede tener la rotura de una tubería de la red. Los factores seleccionados para ello han sido los siguientes:

Caudal no servido

Se refiere al caudal que se deja de servir en caso de fallo en el tramo de red. Cuantifica el impacto de la rotura sobre los clientes, ya que engloba la consideración de cuántos clientes se verían afectados y cuál sería el volumen de agua que dejarían de recibir.

- Para la red de abastecimiento se calcula como el caudal de agua que se deja de servir tras ejecutar el polígono de corte asociado al tramo de red con fallo.
- Se trata de un factor que no afecta a las tuberías de saneamiento.

Debe tenerse en cuenta que el fallo de un tramo de tubería no afecta solamente a los clientes cuya acometida esté en ese tramo, sino a la totalidad de los clientes cuyas acometidas estén dentro del mismo polígono de corte que el del tramo que ha fallado, al ser necesario aislar y vaciar el polígono completamente mientras dura la reparación.

Caudal máximo de pluviales

Este factor es el equivalente en saneamiento al caudal no servido en el caso de abastecimiento. Se refiere al caudal máximo de agua de lluvia que circula por los tramos de red, y representa por tanto una medida de demanda no servida, aunque en este caso no se trata de demanda de abastecimiento, sino de evacuación de agua. Se considera únicamente el caudal de pluviales para esta medida al ser el caudal de fecales despreciable frente a él. Por tanto:

- No se tiene en cuenta para la red de abastecimiento.
- Para la red de saneamiento el cálculo se lleva a cabo mediante la formulación de *Manning*.

Caudal de fuga

Se refiere al caudal asociado al tramo de red de abastecimiento en concepto de agua no registrada (fugas, fraudes y consumos no facturados). Se incorpora este factor para representar el hecho de que los tramos que pertenezcan a sectores con elevado volumen de fugas deben en principio ser más propensos a ser sustituidos. Este valor está sólo disponible para la red de abastecimiento.

Tramo sensible

Se refiere a aquellos tramos de red que se encuentran contenidos en un polígono de corte que contenga a algún tramo de red sensible.

- Para la red de abastecimiento, se considera sensible un tramo de red que abastece a los clientes que se encuentran en la “*Enmienda 46 de la Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano* en su artículo 2, párrafo 1 y punto 7 (locales prioritarios, tales como hospitales, instituciones de atención sanitaria, escuelas, universidades, establecimientos penitenciarios, ...)” así como aquellos tramos que abastecen a *parkings* públicos y centros de bombeo.
- Para la red de saneamiento, se consideran tramos sensibles aquellos tramos de red que pertenecen a la red de impulsión, tramos de red de centros de bombeo y los tramos de red que contienen aguas fecales (o mixtas) y se encuentran cerca (menos de 100 metros) de cauces.

Tal y como se puede observar en la Tabla 17, los valores que pueden tomar los diferentes factores de influencia pueden ser cuantitativos o cualitativos. Estos

últimos se procesarán como variables binarias, es decir, que pueden tomar el valor 0 ó 1. Esto ocurre, por ejemplo, con el factor “tipo de red” que se transforma en 4 variables binarias en función del tipo de red (red arterial y de transporte de abastecimiento, red secundaria de abastecimiento, red de colectores de saneamiento y red secundaria de saneamiento). Se muestra en la Tabla 17 el conjunto de factores de influencia en el Índice de Riesgo según sean cualitativos o cuantitativos y el tratamiento recibido en función del tipo de factor.

Tabla 17: Factores de influencia según tipología y tratamiento

Factor	Tipología	Tratamiento
Tipo de red	Cualitativa	4 variables binarias
Material	Cualitativa	17 variables binarias
Diámetro	Cuantitativa	Variable real
Probabilidad de fallo	Cuantitativa	Variable real
Caudal no servido	Cuantitativa	Variable real
Caudal máximo de pluviales	Cuantitativa	Variable real
Caudal de fuga	Cuantitativa	Variable real
Tramo sensible	Cualitativa	Variable binaria

3.3. Planteamiento del cálculo de ponderaciones

Cada factor de influencia tiene un peso asociado en la formulación del Índice de Riesgo -ecuación (6)-. El cálculo de esta asignación no es trivial ya que se debe tener en cuenta diversos criterios operacionales.

Para tratar esto, se ha realizado un análisis de decisión multicriterio basado en cuestionarios para obtener los pesos en función de la dilatada experiencia de los técnicos de la empresa de aguas de Sevilla (caso de estudio) en la gestión del reemplazo de tramos de red. Como se mencionó anteriormente, el análisis realizado ha sido doble, ajustando en paralelo modelos de elección discreta y de regresión

lineal multivariable para procesar la información obtenida mediante los cuestionarios.

En el siguiente apartado se presentan los cuestionarios diseñados para extraer la información necesaria de estos expertos, así como las variables utilizadas para la codificación de los factores del Índice de Riesgo.

3.3.1. Diseño de cuestionarios

La elaboración de los cuestionarios depende del tipo de análisis que se vaya a realizar (elección discreta o regresión lineal). Esto es debido a que el tipo de respuesta necesaria por parte del decisor es diferente en función del análisis realizado. Sin embargo, el formato de la información que se le proporciona es la misma para ambos análisis.

Los cuestionarios se corresponden con un conjunto de filas, correspondiéndose cada una de ellas con las características de un tramo de red (no necesariamente valores reales de la red). Estos factores son los identificados en los dos subapartados anteriores. La Figura 13 muestra un ejemplo de la estructura de la información para cada tramo de red.

(1) Tipo de red	(2) Material	(3) Diámetro (mm)	(4) Probabilidad de fallo (%)	(5) Caudal no servido (l/s)	(6) Caudal máximo de pluviales (m ³ /s)	(7) Caudal de fuga [m ³ /(h x km)]	(8) Tramo sensible
			Min: 0 ; Máx: 17,36	Min: 0 ; Máx: 38,41	Min: 0 ; Máx: 119,30	Min: 0 ; Máx: 1,84	
Red secundaria de saneamiento	HM	150	14,57	-	0,00	-	NO
Red de colectores principales de saneamiento	Varios	6500	4,42	-	47,01	-	SI
Red arterial y de transporte de abastecimiento	FC	300	3,55	0,19	-	0,43	NO
Red secundaria de abastecimiento	FC	150	3,56	0,20	-	0,18	SI

Figura 13: Estructura de la información para cada tramo de red en los cuestionarios.

Para el análisis de elección discreta, el decisor debe escoger una de entre dos alternativas. Concretamente, se debe indicar el tramo entre cada par cuya sustitución es más urgente (ver Figura 14).

(1) Tipo de red	(2) Material	(3) Diámetro (mm)	(4) Probabilidad de fallo (%)	(5) Caudal no servido (l/s)	(6) Caudal máxima de pluviales (m ³ /s)	(7) Caudal de fuga [m ³ /(h x km)]	(8) Tramo sensible	¿Cuál de los dos tramos GIS sustituiría antes? (Marcar con un 1)
			Mín: 0 ; Máx: 17,36	Mín: 0 ; Máx: 38,41	Mín: 0 ; Máx: 119,30	Mín: 0 ; Máx: 1,84		
Red de colectores principales de saneamiento	HM	1200	1,76	-	15,04	-	SI	1
Red secundaria de abastecimiento	FC	100	2,50	5,23	-	0,2	NO	
Red secundaria de abastecimiento	PE80	50	0,69	0,04	-	-	NO	
Red secundaria de saneamiento	HA	500	1,13	-	0,41	-	NO	1

Figura 14: Ejemplo de cuestionario de selección (elección discreta).

Para el análisis de regresión lineal multivariable, el decisor debe asignar una puntuación numérica entre 0 y 10 a cada tramo de red, siendo el valor 0 indicativo de no existencia de necesidad de reposición, mientras que 10 implica la máxima necesidad de sustitución (ver Figura 15).

(1) Tipo de red	(2) Material	(3) Diámetro (mm)	(4) Probabilidad de fallo (%)	(5) Caudal no servido (l/s)	(6) Caudal máxima de pluviales (m ³ /s)	(7) Caudal de fuga [m ³ /(h x km)]	(8) Tramo sensible	(9) Prioridad de sustitución (0-10)
			Mín: 0 ; Máx: 17,36	Mín: 0 ; Máx: 38,41	Mín: 0 ; Máx: 119,30	Mín: 0 ; Máx: 1,84		
Red secundaria de saneamiento	HM	150	14,57	-	0,00	-	NO	1
Red de colectores principales de saneamiento	Varios	6500	4,42	-	47,01	-	SI	7
Red arterial y de transporte de abastecimiento	FC	300	3,55	0,19	-	0,43	NO	9
Red secundaria de abastecimiento	FC	150	3,56	0,20	-	0,18	SI	4

Figura 15: Ejemplo de cuestionario de valoración numérica (regresión lineal multivariable).

3.3.2. Cumplimentación de cuestionarios

Una vez diseñadas las encuestas, estas fueron cumplimentadas por 69 técnicos de la empresa de aguas pertenecientes a diferentes direcciones (técnica, financiera y comercial), divisiones (calidad de aguas, producción, ingeniería) y departamentos (planificación de infraestructuras, agua potable, proyectos y obras, etc.). El perfil de estos profesionales puede verse en la Tabla 18.

Tabla 18: Relación del personal que cumplimentó los cuestionarios.

DIRECCIÓN	DIVISIÓN	DEPARTAMENTO Y CARGO
Dirección de Calidad, Medio Ambiente y Sostenibilidad	Calidad de Aguas	Calidad Aguas y Modelos
		Responsable Coord. De Calidad Aguas
Dirección Técnica	Producción	Presas y Conservación Infraest.Produc.
		Jefe Conservación Infraestructuras
		Agua Potable
		Jefe de Coordinación Técnica
		Jefe de Aducción
		Aguas Residuales
		Jefe de Aguas Residuales
		Jefe Supervisi. EDAR Ranilla-Mair-Viso
		Jefe Supervisión EDAR Norte
	Jefe Supervisión EDAR Copero	
	Distribución	Redes de Abastecimiento
		Jefe Redes de Abastecimiento
		Técnica Intervenciones Abastecimiento
		Jefe de Interv. Especiales y Pavimentos
		Técnico Intervenciones Abastecimiento

DIRECCIÓN	DIVISIÓN	DEPARTAMENTO Y CARGO
		Técnico Intervenciones Abastecimiento
		Técnico Interv. Abto. A.T. Los Alcores
		Técnico Interv. Abto. A.T. Dos H.
		Técnico Interv. Abto. A.T. La Vega
		Técnico Interv. Abto. A.T. M. Dcha.
		Jefe Diagnóstico y Sectorización
		Apoyo Técnico de Intervenciones Abto.
		Redes de Saneamiento
		Jefe Redes de Saneamiento
		Jefe Intervenciones de Saneamiento
		Técnico Interv. Smt. A.T. La Vega
		Técnico Interv. Smt. A.T. M. Dcha.
		Técnico Diagnóstico y Limpieza
		Apoyo Técnico de Saneamiento
		Técnico Diagnóstico y Limpieza
		Apoyo Técnico de Saneamiento
		Técnico Diagnóstico y Limpieza (JP)
		Acometidas y Contadores
		Coordinador Técnica Acomet. Y Contad.
		Técnico de Laboratorio de Contadores
	Ingeniería	Jefe de División de Ingeniería
		Planificación de Infraestructuras
		Jefe de Planificación de Infraestructuras
		Técnico de Planificación de Infraestructuras
		Técnico de Planificación de Infraestructuras
		Jefe de Modelos Hidráulicos
		Técnica de Modelos

DIRECCIÓN	DIVISIÓN	DEPARTAMENTO Y CARGO
		Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Coordinador de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Coordinador de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Técnico de Proyectos y Obras
		Supervisión y Gest. Calidad
		Jefa de Supervisión y Gest. De Calidad
		Jefa de Gest. De Calidad Infraestructuras
		Sistemas de Información Geográfica
		Jefe de Sistemas de Inform. Geográfica
		Mantenimiento y Sistemas de Información y Control
	Mantenimiento de Instalaciones	
	Jefe de Mantenimiento de Instalaciones	
	Jefe Mto. Instrumentación y Sist. Control	
	Centro Control de Operac.y Planificac.	
	Jefe de Centro de Control Oper. Y Planif	
	Técnico Centro de Control	
	Jefe de Centro de Control	
	Técnico Centro de Control	
	Técnico Centro de Control	
	Técnico de Autpomatización	
	Asesoría Técnica	Ex Jefe de División de Ingeniería
		Ex Jefe de División de Distribución

DIRECCIÓN	DIVISIÓN	DEPARTAMENTO Y CARGO
Dirección Financiera y Comercial	Áreas Territ. y Desarrollo	Área Territorial Margen Dcha
		Jefe Área Territorial Margen Derecha
		Área Territorial La Vega
		Jefe Área Territorial La Vega
		Jefe Licencias Obras y Actuac. A.T. La Vega
		Área Territorial Dos Hermanas
		Jefe Área Territorial Dos H.
		Jefe Licencias Obras y Actuac. A.T. Dos H.
		Área Territorial Los Alcores
		Jefe Área Territorial Los Alcores
Otros	-	Ex Jefe del Departamento de Aguas Residuales

3.3.3. Variables de codificación

El siguiente paso es la codificación de los factores del Índice de Riesgo mediante las correspondientes variables: $x_{j,i}$ en la ecuación (6). Dependiendo de la naturaleza de cada factor, su codificación se realiza mediante una variable continua como, por ejemplo, el volumen de caudal fugado, o mediante una binaria, como el material.

De acuerdo con los factores considerados en la formulación del Índice de Riesgo, y atendiendo a los posibles valores que pueden tomar, la Tabla 19 muestra el listado de variables que componen la función. Cuatro de estas variables representan el tipo de red, dieciséis son para los distintos materiales (siete tipos de material distintos para la red de abastecimiento y nueve para la de saneamiento), otros dos para el diámetro y la probabilidad de fallo y, finalmente, cinco para las consecuencias del fallo. El objetivo del ajuste de los modelos será por tanto encontrar un peso de ponderación para cada uno de ellos en la función de Índice de Riesgo.

Tabla 19: Listado de variables que intervienen en la función del Índice de Riesgo.

Factor	Variable	Interpretación	Uds.
Tipo de red	ABTO_PPAL	Red arterial y de transporte de abastecimiento	Binaria
	ABTO_SEC	Red secundaria de abastecimiento	Binaria
	STO_PPAL	Red de colectores principales de saneamiento	Binaria
	STO_SEC	Red secundaria de saneamiento	Binaria
Material	FC_A	Fibrocemento (Abto)	Binaria
	HF_A	Hierro fundido (Abto)	Binaria
	HACH_A	Hormigón armado con camisa de chapa (Abto)	Binaria
	FD_A	Fundición dúctil (Abto)	Binaria
	PE_A	Polietileno (Abto)	Binaria
	PVC_A	Policloruro de vinilo (Abto)	Binaria
	VARIOS_A	Varios (Abto), que incluye cobre, chapa de acero, fundición gris, ficticio, hierro galvanizado y plomo.	Binaria
	HM_S	Hormigón en masa (Sto)	Binaria
	HA_S	Hormigón armado (Sto)	Binaria
	PVC_S	Policloruro de vinilo (Sto)	Binaria
	FL_S	Fábrica de ladrillo (Sto)	Binaria
	G_S	Gres (Sto)	Binaria
	SGGA_S	Semigrés/gres antiguo (Sto)	Binaria
	FD_S	Fundición dúctil (Sto)	Binaria
HAPE_S	Hormigón armado + Polietileno (Sto)	Binaria	
VARIOS_S	Varios (Sto), que contiene acero inoxidable, chapa de acero, ficticio, polietileno y poliéster reforzado con fibra de vidrio	Binaria	
Diámetro	DIAM	Diámetro del tramo de red	m
Prob de fallo	PF	Probabilidad de fallo por cien metros de tramo de red en tanto por uno	Adim.
Caudal no servido	DEMANDA	Caudal no servido en caso de fallo de un tramo de abastecimiento en litros por segundo	l/s
Caudal máx. pluviales	PLUVIALES	Caudal máximo de pluviales por un tramo de saneamiento	m ³ /s
Caudal de fuga	FUGAS	Caudal de fuga asignado al tramo de abastecimiento	m ³ /(h·km)
Tramo sensible	SENSIBLE	Tramo sensible ante un fallo	Binaria

3.4. Obtención de ponderaciones

Este subapartado presenta el análisis llevado a cabo sobre los resultados de los cuestionarios de selección y de valoración numérica. Los primeros de ellos se procesan mediante la técnica de elección discreta, mientras que los resultados de los segundos se extraen empleando un ajuste por regresión lineal multivariable.

Además, los cuestionarios se han analizado, primero, de manera conjunta y para todos los factores sometidos a análisis. Sin embargo, el exceso de factores a considerar (26 en total) desvirtúa dicho análisis, resultando muchos de ellos no significantes para la toma de decisiones de los encuestados. Por ello, posteriormente se lleva a cabo un estudio más concluyente considerando un número más reducido de variables.

Además, con el objetivo de discriminar posibles variaciones en la respuestas de los cuestionarios asociadas a los roles de los técnicos, también se han realizado segmentaciones de los encuestados por las diferentes Divisiones o Departamentos de la empresa a las que pertenecen.

Un primer análisis considera la totalidad de los encuestados y que trabajan en cualquier División de la compañía (apartados 3.4.1 y 3.4.2). En segundo lugar, se reduce el análisis a los cuestionarios contestados solo por los técnicos de la División de Ingeniería, esto es, 21 cuestionarios (apartado 3.4.3). Por último, se lleva a cabo un análisis aún más reducido teniendo en cuenta únicamente 7 encuestados: los correspondientes a los departamentos de Planificación de Infraestructuras y Sistemas de Información Geográfica, integrados dentro de la misma División de Ingeniería (apartado 3.4.4).

Esta disgregación tiene su razón en que los técnicos de esta División, y en especial los de los ambos Departamentos mencionados, son los que tradicionalmente han desarrollado los criterios de la compañía para definir qué elementos de la red renovar con mayor prioridad y los que han elaborado los planes de actuación

concretos asociados a cada obra: selección y orden de afección de las calles involucradas, plazo de ejecución, etc.

3.4.1. Todas las variables y todos los encuestados

Como se ha indicado anteriormente, este primer análisis se ha realizado considerando todos los cuestionarios cumplimentados por todos los técnicos de la compañía, que suponen un total de 69 encuestas diferentes, y para todas las variables reflejadas en la Tabla 19, que codifican todos los factores incluidos en el estudio. En primer lugar, se analizan los resultados del cuestionario de selección y, posteriormente, se muestran los de los cuestionarios de valoración numérica.

3.4.1.1. Cuestionario de selección

Primeramente, y con el fin de interpretar correctamente la salida de cada análisis realizado, se describe brevemente cada uno de los campos de información presentes en la salida:

- La primera columna de los resultados recoge el nombre de las variables que forman parte del Índice de Riesgo.
- “**coef**”: el coeficiente que representa el peso de cada factor se muestra en la segunda columna. Este valor se corresponde con los parámetros β que multiplican a los valores de las variables en la expresión del Índice de Riesgo. Ver ecuación (6).
- “**std error**”: error estándar del coeficiente. Mide la dispersión del valor del coeficiente obtenido. Si este valor es del mismo orden de magnitud que el valor del propio coeficiente, es un indicio de que el factor correspondiente no es significativo y que no ha resultado relevante para los encuestados a la hora de priorizar la reposición de los tramos de red.

- “ $P > |z|$ ”: probabilidad de que el coeficiente obtenido tenga un valor nulo, lo que significaría que el factor no es relevante para los encuestados, y se conoce por *p-value*. Por tanto, un factor cuyo *p-value* sea alto indica que dicho factor no es significativo.
- “[0.025, 0.975]”: intervalo de confianza de 95%. Es decir, muestran para cada factor los valores en los que oscilará su respectivo coeficiente con un nivel de confianza del 95%. Cuanto más reducido sea este intervalo (en comparación con el valor del coeficiente) más influencia tendrá ese criterio para el reemplazo de red.

Tras esta aclaración, la Tabla 20 muestra los resultados obtenidos para este primer estudio realizado:

Tabla 20: Cuestionarios de selección. Conjunto total de variables y encuestados.

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	,RESP				No. Observations:	,1,356
Model:	,Multinomial Logit Model,				Df Residuals:	,1,330
Method:	,MLE				Df Model:	,26
Pseudo R-squ.:	,0.217				Pseudo R-bar-squ.:	,0.189
AIC:	,1,523.752				Log-Likelihood:	, -735.876
BIC:	,1,659.272				LL-Null:	, -939.908
	, coef	, std err	, z	, $P > z $, [0.025	, 0.975]
ABTO_PPAL,	5.3255,	2.97e+06,	1.79e-06,	1.000,	-5.82e+06,	5.82e+06
ABTO_SEC ,	4.6848,	2.95e+06,	1.59e-06,	1.000,	-5.79e+06,	5.79e+06
STO_PPAL ,	-8.2702,	3.41e+06,	-2.42e-06,	1.000,	-6.69e+06,	6.69e+06
STO_SEC ,	-1.7402,	3.01e+06,	-5.79e-07,	1.000,	-5.89e+06,	5.89e+06
FC_A ,	1.7782,	nan,	nan,	nan,	nan,	nan
FD_A ,	-6.8841,	2.34e+06,	-2.94e-06,	1.000,	-4.58e+06,	4.58e+06
HACH_A ,	1.0231,	1.79e+06,	5.7e-07,	1.000,	-3.52e+06,	3.52e+06
HF_A ,	-1.3421,	nan,	nan,	nan,	nan,	nan
PE_A ,	-6.3802,	1.14e+06,	-5.62e-06,	1.000,	-2.23e+06,	2.23e+06
PVC_A ,	2.2526,	1.45e+06,	1.56e-06,	1.000,	-2.84e+06,	2.84e+06

VARIOS_A	,	19.5629,	nan,	nan,	nan,	nan,	nan
HM_S	,	-0.2270,	3.37e+06,	-6.73e-08,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
HA_S	,	8.8432,	3.37e+06,	2.62e-06,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
PVC_S	,	-42.9526,	1.24e+07,	-3.48e-06,	1.000,	-2.42e+07,	2.42e+07
FL_S	,	18.4256,	3.37e+06,	5.46e-06,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
G_S	,	-5.3477,	3.37e+06,	-1.59e-06,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
SGGA_S	,	-8.1938,	3.37e+06,	-2.43e-06,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
HAPE_S	,	-22.7788,	6.71e+08,	-3.4e-08,	1.000,	-1.31e+09,	1.31e+09
FD_S	,	27.8824,	4.06e+06,	6.87e-06,	1.000,	-7.96e+06,	7.96e+06
VARIOS_S	,	14.3384,	3.37e+06,	4.25e-06,	1.000,	-6.61e+06,	6.61e+06
DIAM	,	0.0006,	0.000,	2.899,	0.004,	0.000,	0.001
PF	,	98.4915,	9.330,	10.557,	0.000,	80.206,	116.777
DEMANDA	,	2.2674,	0.608,	3.730,	0.000,	1.076,	3.459
PLUVIALES	,	-0.0529,	0.081,	-0.651,	0.515,	-0.212,	0.106
FUGAS	,	5.0183,	0.807,	6.222,	0.000,	3.437,	6.599
SENSIBLE	,	7.7940,	2.451,	3.180,	0.001,	2.991,	12.597

De la Tabla 20 se deduce a simple vista, comparando los valores de los coeficientes obtenidos para los factores (*coef*) y sus respectivos errores estándar (*std err*), que tanto las variables que corresponden al tipo de red como las que representan los tipos de materiales no han resultado significativas para los encuestados de forma general. Esto se deduce del orden de magnitud considerablemente superior de los valores de los errores estándar para estas variables frente a sus coeficientes o, igualmente, apreciando que el *p-value* vale uno para todas ellas.

Lo contrario ocurre para a las variables “DIAM”, “PF”, “DEMANDA”, “FUGAS” y “SENSIBLE”, que presentan un *p-value* (“ $P > |z|$ ”) próximo a cero, es decir, sí son significativas para el conjunto de los encuestados. En cuanto al caudal máximo de pluviales, se obtiene una probabilidad de que su coeficiente sea nula superior al 50%.

La Figura 16 muestra la importancia relativa de cada factor según los cuestionarios de selección. Ésta da información de la aportación de cada factor al Índice de Riesgo de la ecuación (6), esto es, el sumando $\beta_j \cdot x_{j,i}$ correspondiente a cada factor.

Así, para su representación gráfica se ha multiplicado el coeficiente obtenido en la Tabla 20 por el valor promedio de cada variable en el cuestionario de selección. Por ejemplo, el valor que representa la columna de la variable “DIAM” en la Figura 16 corresponde al producto $\beta_{DIAM} \cdot \bar{x}_{DIAM}$, donde \bar{x}_{DIAM} es el promedio de los diámetros de todos los tramos presentes en el cuestionario de selección.

Además, los valores que se muestran están normalizados, resultando la suma de todas las importancias relativas igual a la unidad. Por tanto, la gráfica da información de cuánto más relevante es un factor frente a otro para determinar la necesidad de reposición.

En ella se observa que el factor más influyente es el carácter sensible del tramo, con más del 50% de la importancia relativa de los factores. Los siguientes factores en importancia han resultado ser la probabilidad de fallo y el caudal fugado asignado al tramo.

Además, la importancia relativa de la variable “PLUVIALES” resulta ser negativa. Es decir, según el análisis, este factor influye negativamente en la necesidad de reemplazo. Esta circunstancia, a priori incoherente, se debe a la poca significancia del factor. Según la Tabla 20, el coeficiente de este factor se encontrará, con un 95% de probabilidad, en el rango de valores $[-0.212, 0.106]$. El hecho de que el valor 0 esté incluido en dicho intervalo es indicador de la poca significancia de este factor en el necesidad de reposición final

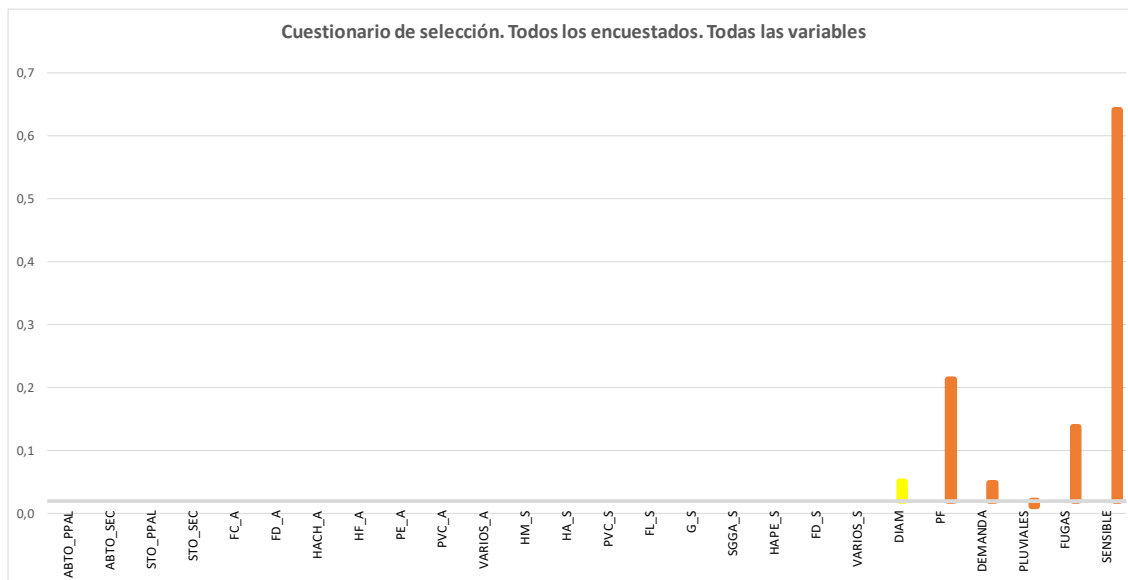


Figura 16: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto total de variables y encuestados.

3.4.1.2. Cuestionario de valoración numérica.

Seguidamente se procesan los cuestionarios de valoración numérica. El formato de salida de estos resultados (Tabla 21) es el mismo que para los cuestionarios de selección. La primera columna recoge el nombre de las variables; la segunda y tercera muestran los coeficientes y su respectivo error estándar; la información sobre la significancia de la variable (*p-value*) se presenta en las columnas cuarta y quinta; finalmente las columnas seis y siete registran el rango de valores entre los que se moverá el coeficiente con una probabilidad del 95%.

Tabla 21: Cuestionarios de valoración numérica. Conjunto total de variables y encuestados.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	,PUNT			R-squared:		, 0.324
Model:	,OLS			Adj. R-squared:		, 0.312
Method:	,Least Squares			F-statistic:		, 27.50
Prob (F-statistic):	,1.68e-95			Log-Likelihood:		, -2999.2
No. Observations:	, 1345			AIC:		, 6046.
Df Residuals:	, 1321			BIC:		, 6171.
Df Model:	, 23					
Covariance Type:	,nonrobust					
	, coef	, std err	, t	,P> t	, [0.025	, 0.975]
const	, 2.4961,	0.235,	10.629,	0.000,	2.035,	2.957
ABTO_PPAL,	1.3650,	0.237,	5.758,	0.000,	0.900,	1.830
ABTO_SEC ,	0.9855,	0.235,	4.191,	0.000,	0.524,	1.447
STO_PPAL ,	0.1573,	0.281,	0.559,	0.576,	-0.395,	0.709
STO_SEC ,	-0.0116,	0.254,	-0.046,	0.963,	-0.509,	0.486
FC_A ,	0.7815,	0.332,	2.354,	0.019,	0.130,	1.433
FD_A ,	-1.8520,	0.363,	-5.098,	0.000,	-2.565,	-1.139
HACH_A ,	0.0921,	0.433,	0.213,	0.832,	-0.758,	0.942
HF_A ,	0.0224,	0.458,	0.049,	0.961,	-0.875,	0.920
PE_A ,	-0.1688,	0.504,	-0.335,	0.738,	-1.158,	0.821
PVC_A ,	0.6509,	0.773,	0.842,	0.400,	-0.865,	2.167
VARIOS_A ,	2.8244,	2.004,	1.409,	0.159,	-1.107,	6.756

HM_S	,	1.1415,	0.371,	3.079,	0.002,	0.414,	1.869
HA_S	,	0.3601,	0.380,	0.947,	0.344,	-0.386,	1.106
PVC_S	,	0.0641,	1.481,	0.043,	0.965,	-2.842,	2.970
FL_S	,	1.3808,	0.612,	2.258,	0.024,	0.181,	2.580
G_S	,	-0.6748,	1.474,	-0.458,	0.647,	-3.567,	2.218
SGGA_S	,	-0.3383,	1.353,	-0.250,	0.803,	-2.993,	2.316
HAPE_S	,	-0.7217,	0.698,	-1.035,	0.301,	-2.090,	0.647
FD_S	,	-2.1063,	1.479,	-1.424,	0.155,	-5.008,	0.796
VARIOS_S	,	1.0403,	0.379,	2.744,	0.006,	0.297,	1.784
DIAM	,	-0.0002,	0.000,	-1.404,	0.161,	-0.001,	9.3e-05
PF	,	40.3070,	5.625,	7.165,	0.000,	29.271,	51.343
DEMANDA	,	0.2099,	0.692,	0.303,	0.762,	-1.148,	1.568
PLUVIALES	,	0.0681,	0.031,	2.166,	0.030,	0.006,	0.130
FUGAS	,	1.4629,	0.426,	3.436,	0.001,	0.628,	2.298
SENSIBLE	,	1.0625,	0.135,	7.857,	0.000,	0.797,	1.328

Los resultados obtenidos mediante este análisis de regresión lineal difieren respecto a los que se extrajeron mediante la técnica de elección discreta. Según los cuestionarios de valoración, las variables de tipo de red o material han resultado ser algo más significativas que según los de selección. Se puede observar, por ejemplo, que la probabilidad de que el coeficiente de las variables “ABTO_PPAL” y “ABTO_SEC” sea nulo no existe. Mientras que el tipo de red para saneamiento (“STO_PPAL” y “STO_SEC”) no ha resultado ser influyente.

En cuanto a los materiales, solo algunos de ellos han sido relevantes para los encuestados. Los materiales como el fibrocemento o la fundición dúctil en la red de abastecimiento (FC_A y FD_A) o el hormigón en masa y la fábrica de ladrillo en saneamiento (HM_S y FL_S) tienen un *p-value* muy bajo, lo que indica que han sido tenidos en cuenta, de forma general, por los técnicos.

Otro aspecto que difiere del primer análisis es que, mientras los cuestionarios de selección no consideran relevante el factor “PLUVIALES”, en los cuestionarios de valoración numérica es la demanda no servida (“DEMANDA”) la variable que no ha resultado influyente.

Toda esta información se muestra gráficamente en la Figura 17. En ella, se han empleado distintos colores para distinguir los factores entre sí: azul, para el tipo de red (ABTO_PPAL, ABTO_SEC, STO_PPAL, STO_SEC); verde, los distintos materiales en cada tipo de red (FC_A, HF_A, HACH_A, FD_A, PE_A, PVC_A y VARIOS_A para la red de abastecimiento y HM_S, HA_S, PVC_S, FL_S, G_S, SGG_A_S, FD_S, HAPE_S, VARIOS_S para saneamiento); amarillo para el diámetro (DIAM); y naranja, para el resto de factores (PF, DEMANDA, PLUVIALES, FUGAS y SENSIBLE).



Figura 17: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto total de variables y para todos los encuestados.

3.4.2. Conjunto reducido de variables y todos los encuestados

Los resultados obtenidos en el apartado anterior muestran diferencias considerables si se trata de los cuestionarios de selección o bien los de valoración numérica. Este hecho se debe a la dispersión de los datos de los cuestionarios, esto es, no existe un comportamiento homogéneo en la respuesta de unos técnicos a otros. Este evento es más significativo, si cabe, en los cuestionarios de valoración numérica: mientras en los cuestionarios de selección el encuestado debe elegir entre dos alternativas, en los de valoración numérica se requiere un criterio de puntuación que difiere de un técnico a otro. Es decir, dos encuestados pueden valorar un tramo de red idéntico de diferente manera.

Otra circunstancia que desvirtúa el análisis es el elevado número de variables (26 en total). El efecto de considerar demasiadas variables puede alterar el resultado final. De hecho, como se verá a continuación, la consideración o no en el análisis de variables que no tienen influencia para los encuestados (factores cuyo coeficiente es nulo) modifica el coeficiente que obtienen otras variables que sí resultan relevantes para los encuestados. Por esta razón, se propone realizar de nuevo el análisis empleando un número más reducido de variables.

Por ejemplo, la probabilidad de fallo asociada a un tramo de red es una medida calculada a partir de las características propias del tramo, caracterizando con la misma probabilidad de fallar a todos los tramos del mismo tipo de red, material y diámetro. Es decir, las variables de tipo de red, material y diámetro están subrogadas a la probabilidad de fallo. Por tanto, estos factores no deberían introducirse de manera independiente en el cálculo del Índice de Riesgo.

De esta manera, se propone extraer del análisis estas variables subrogadas, empleando a partir de ahora únicamente las siguientes:

- PF (%): Probabilidad de fallo por cien metros de tramo de red.

- DEMANDA (l/s): Caudal no servido en caso de fallo de un tramo de abastecimiento.
- PLUVIALES (m³/s): Caudal máximo de pluviales por un tramo de saneamiento.
- FUGAS (m³/h·km): Caudal de fuga asignado al tramo de abastecimiento.
- SENSIBLE (-): Tramo sensible ante un fallo.

3.4.2.1. Cuestionario de selección

La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos para este conjunto más reducido de variables y teniendo en cuenta la totalidad de los cuestionarios de selección.

Tabla 22: Cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	,RESP			No. Observations:	,1,356	
Model:	,Multinomial Logit Model,			Df Residuals:	,1,351	
Method:	,MLE			Df Model:	,5	
Pseudo R-squ.:	,0.161			Pseudo R-bar-squ.:	,0.155	
AIC:	,1,587.724			Log-Likelihood:	, -788.862	
BIC:	,1,613.785			LL-Null:	, -939.908	
	, coef	, std err	, z	,P> z	, [0.025	, 0.975]
PF	, 47.8372,	3.841,	12.454,	0.000,	40.309,	55.365
DEMANDA	, 2.1400,	0.583,	3.674,	0.000,	0.998,	3.282
PLUVIALES,	0.0875,	0.025,	3.527,	0.000,	0.039,	0.136
FUGAS	, 1.0770,	0.360,	2.995,	0.003,	0.372,	1.782
SENSIBLE	, 1.0942,	0.183,	5.976,	0.000,	0.735,	1.453

Aparte de los valores de los coeficientes, el valor más representativo de la salida es el correspondiente al *p-value* (“P>|z|” en la Tabla 22). Como se ha indicado previamente, este parámetro da información de la significancia de cada factor, siendo más representativo en las decisiones de los encuestados cuanto más se acerca al valor nulo.

Se puede afirmar, por tanto, que los encuestados han tenido en cuenta todos los factores del análisis, puesto que ningún factor presenta un *p-value* alto, esto es, la probabilidad de que el coeficiente de alguno de los factores sea nulo es inexistente. O lo que es lo mismo: el error estándar de los coeficientes es, para cada factor, de un orden de magnitud inferior al del propio coeficiente, lo que confirma que las variables son significativas.

Por otro lado, la Figura 18 representa la importancia relativa de cada factor en la priorización de reposición. De ésta se concluye que la probabilidad de fallo del tramo de red, así como su carácter de sensible ante un fallo, son los criterios que los encuestados más han tenido en consideración para priorizar las tareas de reposición, representando cada uno de ellos más de un 35% de la influencia relativa.



Figura 18: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

3.4.2.2. Cuestionario de valoración numérica

De los cuestionarios de valoración numérica se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 23. A diferencia de lo extraído de los cuestionarios de selección, la demanda no servida en caso de fallo no tiene significancia respecto al resto de variables: mientras que el resto de factores presentan un *p-value* cercano a cero, la probabilidad de que el coeficiente que multiplica al factor “DEMANDA” sea nula es mayor al 50% (*p-value* = 0.593).

Tabla 23: Cuestionarios de valoración numérica. Todos los encuestados.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	, PUNT			R-squared:		0.248
Model:	, OLS			Adj. R-squared:		0.245
Method:	, Least Squares			F-statistic:		88.42
Prob (F-statistic):	, 1.79e-80			Log-Likelihood:		-3070.4
No. Observations:	, 1345			AIC:		6153.
Df Residuals:	, 1339			BIC:		6184.
Df Model:	, 5					
Covariance Type:	, nonrobust					
	, coef	, std err	, t	, P> t	, [0.025	, 0.975]
const	, 2.9690	, 0.111	, 26.839	, 0.000	, 2.752	, 3.186
PF	, 61.7157	, 3.277	, 18.832	, 0.000	, 55.287	, 68.144
DEMANDA	, 0.3810	, 0.713	, 0.535	, 0.593	, -1.017	, 1.779
PLUVIALES	, 0.0454	, 0.021	, 2.116	, 0.035	, 0.003	, 0.088
FUGAS	, 1.3014	, 0.373	, 3.486	, 0.001	, 0.569	, 2.034
SENSIBLE	, 0.9432	, 0.140	, 6.760	, 0.000	, 0.670	, 1.217

En este caso, la probabilidad de fallo adquiere una mayor relevancia sobre el resto de variables, especialmente respecto al caudal no servido en caso de fallo y al caudal de pluviales en la red de saneamiento. Según la Figura 19, la decisión sobre la priorización en la reposición de la red vendrá dada, en un 50%, por el factor de la probabilidad de fallo, mientras que el carácter sensible de un tramo ante el fallo supone algo más del 30% de la importancia relativa.

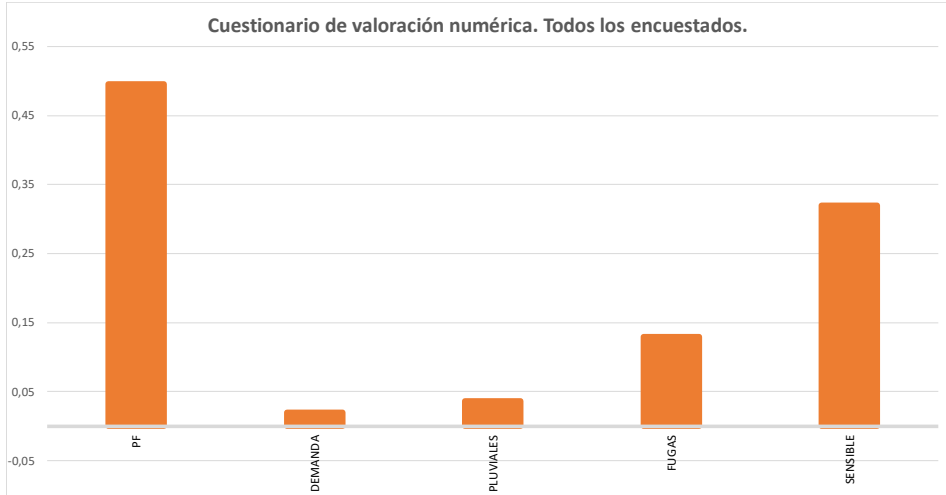


Figura 19: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

3.4.2.3. Análisis de correlaciones

Un análisis adicional que puede ser de interés consiste en contrastar el comportamiento de la puntuación otorgada por los encuestados en los cuestionarios de valoración en función de las características del tramo, esto es, comprobar la correlación existente entre los valores de los factores y la puntuación otorgada por los encuestados a dicho tramo. Esto permite obtener información adicional sobre si un factor influye y en qué medida en el Índice de Riesgo.

Para ello, se promedia para cada posible puntuación (0-10) los valores de los distintos factores que caracterizan a un tramo de red y que han sido evaluados con dicha puntuación.

Puntuación vs Probabilidad de fallo

La Figura 20 justifica la correlación positiva existente entre la probabilidad de fallo y la puntuación otorgada por los encuestados en los cuestionarios de valoración numérica. Ésta se ha obtenido calculando para cada posible puntuación el valor medio de la probabilidad de fallo de los tramos que han sido evaluados con dicha puntuación.

El buen ajuste obtenido ($R^2=0.9911$) confirma la importante influencia de este criterio en la decisión tomada por los encuestados para valorar la necesidad de reposición de un tramo de red. Este resultado es razonable, pues se observa en la Figura 19 que la probabilidad de fallo ha sido el criterio más relevante para los encuestados.

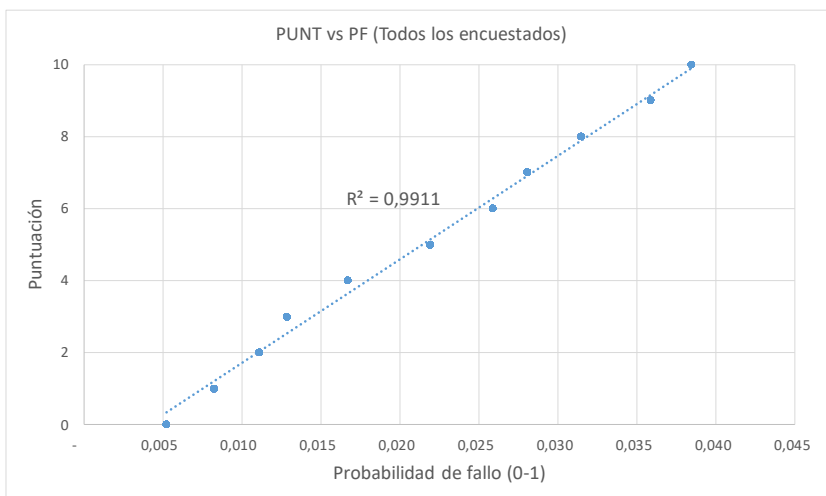


Figura 20: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

Puntuación vs Caudal no servido

Nuevamente, tal y como puede observarse en la Figura 21, la correlación entre la variable “DEMANDA” y la puntuación vuelve a ser positiva (a mayor caudal no servido en caso de fallo, más urgente es acometer la reposición del tramo). Sin embargo, el ajuste no es tan bueno, lo que indica que no ha sido un factor tan decisivo para los encuestados como la probabilidad de fallo. Esta interpretación se concluyó previamente al analizar la Tabla 23.

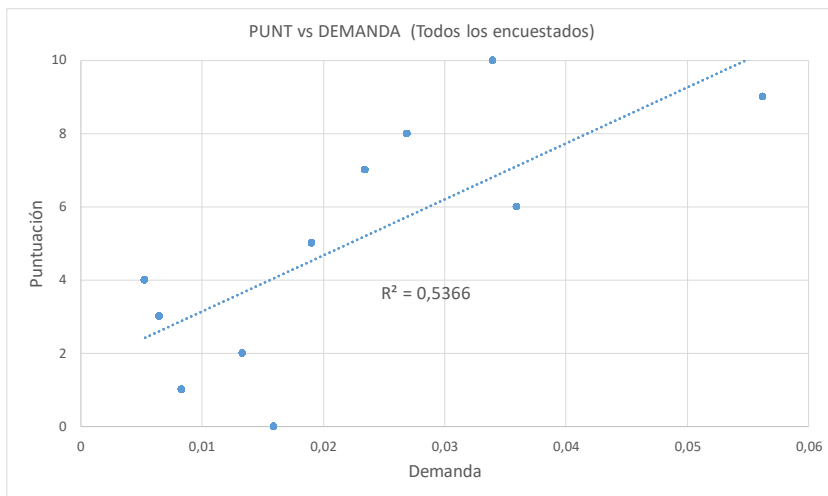


Figura 21: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la demanda no servida en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

Puntuación vs Caudal de pluviales

Según la Figura 22, la correlación entre la puntuación y el caudal de aguas pluviales en un tramo de saneamiento es ligeramente negativa. Este resultado difiere de lo extraído anteriormente, pues el coeficiente obtenido para el factor “PLUVIALES” es positivo (ver Tabla 23).

Este extraño comportamiento puede tener su justificación en la poca significancia que los encuestados han otorgado a este factor. Aunque, la probabilidad de que el coeficiente de este factor sea nulo es relativamente baja ($p\text{-value} = 0.035$), se observa también que este coeficiente y su error estándar son del mismo orden de magnitud. Esta alta dispersión del coeficiente de "PLUVIALES", junto con la baja influencia que ha supuesto esta variable, explican la ligera correlación negativa entre este factor y la puntuación, así como una bondad del ajuste considerablemente baja ($R^2=0.0322$).

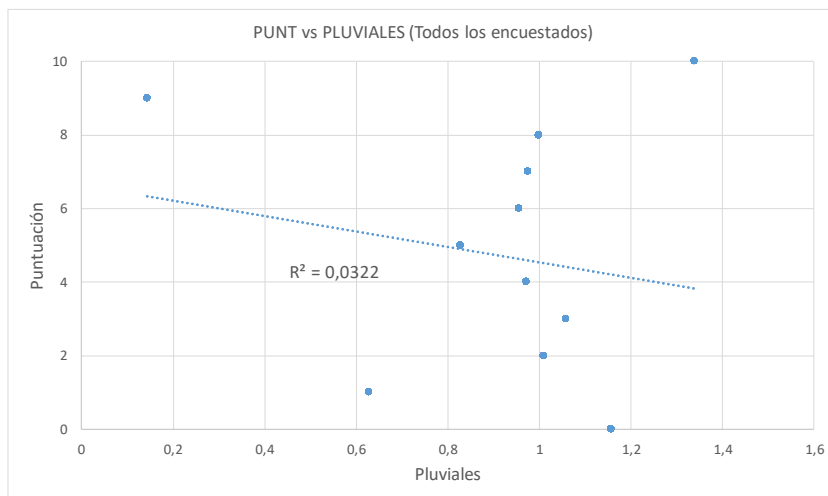


Figura 22: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de aguas pluviales que circula por un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

Puntuación vs Caudal fugado

El cuarto factor es el caudal fugado. En la Figura 23 se muestra, para cada posible puntuación que han recibido los tramos de red en el cuestionario, el promedio del caudal fugado para esta valoración. De nuevo se distingue una evolución creciente de la puntuación con el caudal de agua fugado que se asigna a un tramo de

abastecimiento. Además, el ajuste obtenido ($R^2=0.5689$) vuelve a ser más representativo, como era de esperar tras lo extraído de la Tabla 23.

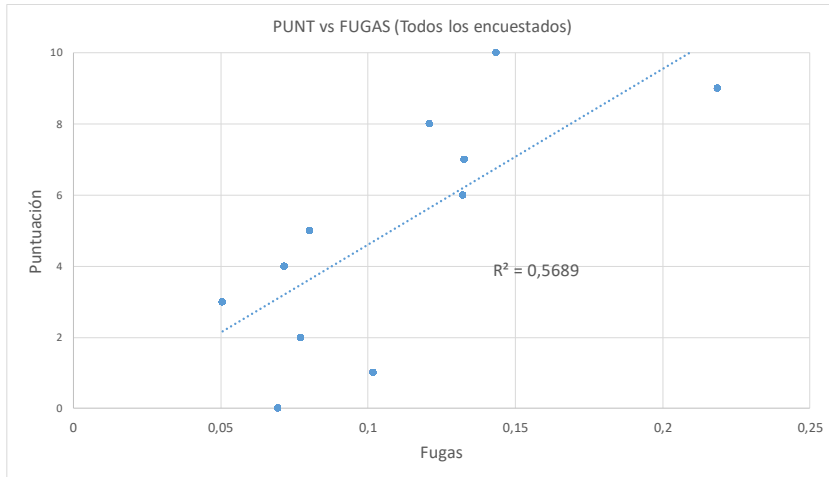


Figura 23: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado a un tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

Puntuación vs Tramo sensible

Por último, la Figura 24 muestra claramente que los tramos sensibles han sido puntuados con mayor riesgo que los no sensibles, lo que justifica una correlación positiva entre la necesidad de reposición y el factor “SENSIBLE”. Además, el ajuste obtenido para este factor no es bajo ($R^2=0.5001$), por lo que es un factor relevante para los encuestados.

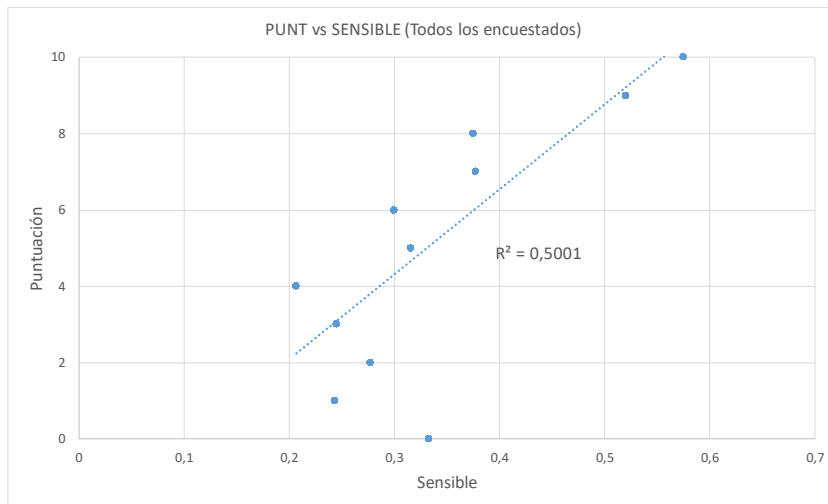


Figura 24: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter sensible de un tramo. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados.

3.4.3. Conjunto reducido de variables para la División de Ingeniería

Un tercer análisis ha investigado la influencia en la solución de realizar segmentaciones en las muestras. Este estudio ajusta los modelos a partir únicamente de los cuestionarios contestados por los técnicos de la División de Ingeniería. Este área ha contestado, en total, 21 cuestionarios (lo que supone aproximadamente un 30% del total) e incluye a los Departamentos de:

- Planificación de Infraestructuras (6)
- Proyectos y Obras (12)
- Supervisión y Gestión de Calidad (2)
- Sistemas de Información Geográfica (1)

De manera similar a los apartados anteriores, se analizan en primer lugar los cuestionarios de selección y, posteriormente, los de valoración numérica.

3.4.3.1. Cuestionarios de selección

La Tabla 24 recoge la información de salida de este análisis. En ella se muestran los coeficientes para cada factor, así como la información sobre su significancia para este grupo de encuestados.

A diferencia de lo que se extraía del estudio completo de los cuestionarios, los técnicos de la División de Ingeniería no han basado su elección en el caudal fugado. El valor del error estándar para esta variable supera el del propio coeficiente, lo que puede interpretarse como una influencia nula de este factor para la priorización de reposiciones de red. En cambio, el resto de variables sí son significativas para esta sección de encuestados (*p-value* cercano a cero) y tienen un coeficiente en el ajuste positivo.

Tabla 24: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	RESP				No. Observations:	416
Model:	Multinomial Logit Model				Df Residuals:	411
Method:	MLE				Df Model:	5
Pseudo R-squ.:	0.188				Pseudo R-bar-squ.:	0.170
AIC:	478.451				Log-Likelihood:	-234.226
BIC:	498.605				LL-Null:	-288.349
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
PF	51.2702	7.064	7.258	0.000	37.426	65.115
DEMANDA	2.6279	1.158	2.270	0.023	0.359	4.897
PLUVIALES	0.1108	0.041	2.682	0.007	0.030	0.192
FUGAS	0.2678	0.505	0.530	0.596	-0.722	1.258
SENSIBLE	1.2199	0.330	3.693	0.000	0.572	1.867

En la Figura 25 se observa la importancia relativa de los factores entre sí para este análisis. Comparando estos resultados con los obtenidos para todos los cuestionarios conjuntamente (Figura 18), se distingue una clara similitud entre ambos análisis. La probabilidad de fallo y el carácter sensible del tramo vuelven a ser los dos factores más relevantes para los encuestados, ya que ambos suponen más del 70% en la decisión para los técnicos de esta División.

Por lo general, se puede considerar esta División como una buena representación del conjunto global de encuestados.

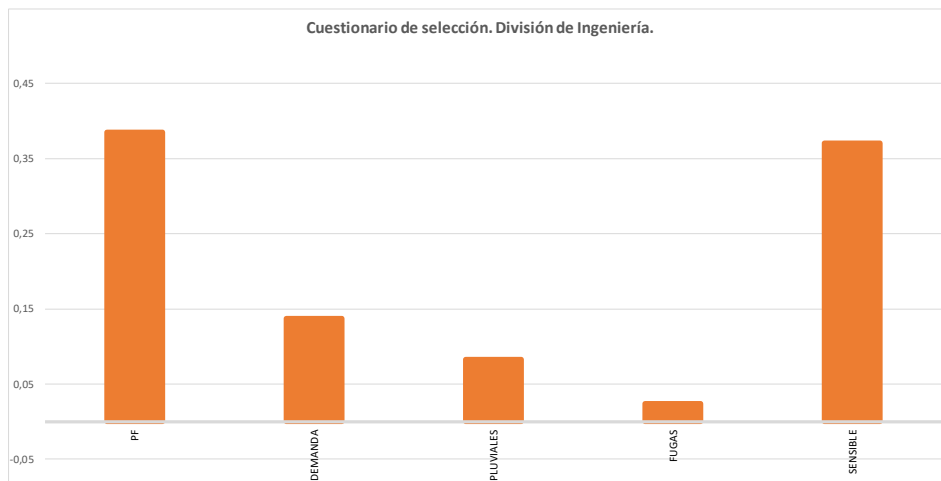


Figura 25: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

3.4.3.2. Cuestionario de valoración numérica

Si se analizan los cuestionarios de valoración numérica que cumplimentaron los técnicos de esta División, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25: Resultados de los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	, PUNT			R-squared:		0.308
Model:	, OLS			Adj. R-squared:		0.299
Method:	, Least Squares			F-statistic:		35.08
Prob (F-statistic):	, 1.14e-29			Log-Likelihood:		-895.51
No. Observations:	, 400			AIC:		1803.
Df Residuals:	, 394			BIC:		1827.
Df Model:	, 5					
Covariance Type:	, nonrobust					
	, coef	, std err	, t	, P> t	, [0.025	, 0.975]
const	, 2.2901,	0.198,	11.549,	0.000,	1.900,	2.680
PF	, 67.0609,	5.484,	12.228,	0.000,	56.279,	77.843
DEMANDA	, 0.1515,	0.982,	0.154,	0.878,	-1.780,	2.083
PLUVIALES	, 0.0398,	0.037,	1.062,	0.289,	-0.034,	0.113
FUGAS	, 1.8967,	0.690,	2.747,	0.006,	0.539,	3.254
SENSIBLE	, 0.5768,	0.246,	2.343,	0.020,	0.093,	1.061

Según la Tabla 25, y al igual que ocurría en el conjunto global de cuestionarios de valoración numérica (Tabla 23), el factor “DEMANDA” tiene un efecto muy bajo en la decisión de los encuestados. Este factor tendrá un coeficiente nulo con una probabilidad cercana a al 90% ($p\text{-value} = 0.878$). Este conjunto de encuestados tampoco ha considerado, aunque en menor medida, el caudal de aguas pluviales, pues el coeficiente y su error estándar toman valores muy cercanos entre sí.

En cambio, los factores “PF”, “FUGAS” y “SENSIBLE” son los que más presentes han tenido estos técnicos para priorizar las reposiciones de red. La gráfica demuestra también que más del 55% de la importancia relativa la adquiere el factor de la probabilidad de fallo, mientras que los factores “FUGAS” y “SENSIBLE” comparten de manera aproximada el resto de relevancia.

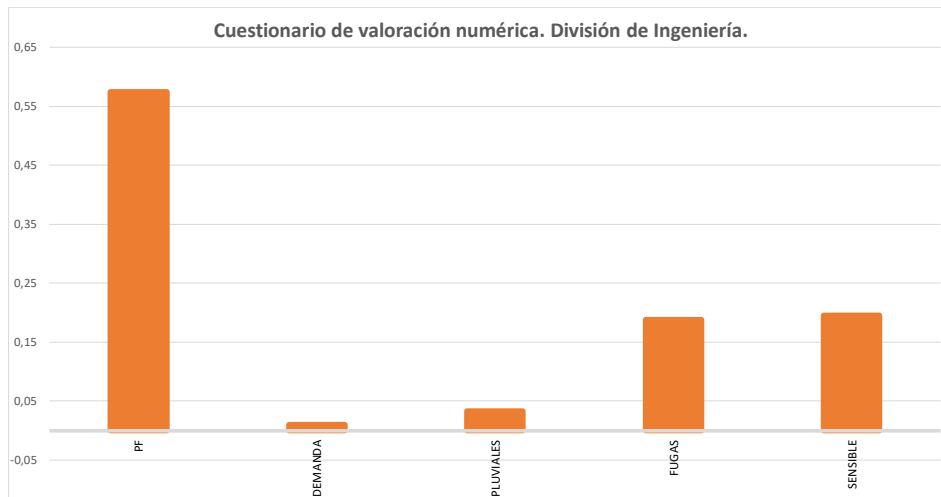


Figura 26: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Las diferencias observadas entre este estudio y el correspondiente al de elección discreta son semejantes ya se analicen el conjunto total de cuestionarios o bien los correspondientes a la División de Ingeniería. Esto corrobora lo manifestado previamente: la División de Ingeniería, suponiendo un 30% de los cuestionarios, representa fielmente al conjunto global de los técnicos.

3.4.3.3. Análisis de correlaciones

A continuación, se estudia la correlación existente entre los factores y la puntuación obtenida en los cuestionarios de valoración numérica para este grupo de encuestados.

Puntuación vs Probabilidad de fallo

Tal y como se observa en la Figura 27, existe una clara y creciente relación entre la probabilidad de fallo del tramo y la puntuación obtenida en los cuestionarios. Este

resultado era esperable tras conocer los resultados de la Figura 26. Además, es el factor que los encuestados de la División de Ingeniería más han tenido en consideración, lo que se justifica con el buen ajuste obtenido ($R^2=0.9339$).

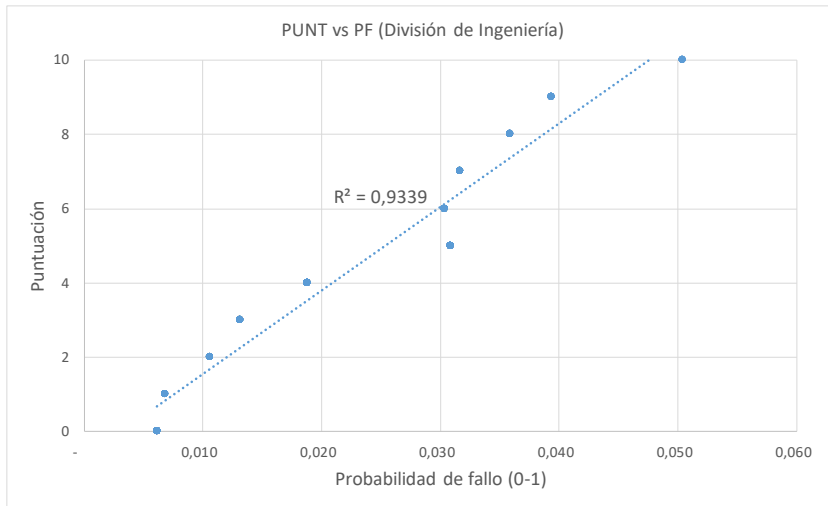


Figura 27: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Puntuación vs Caudal no servido

En cuanto a la variable “DEMANDA”, la correlación entre ésta y la puntuación vuelve a ser positiva. Sin embargo, el ajuste obtenido para esta variable ($R^2=0.1991$) indica que los técnicos de la División de Ingeniería no consideran relevante el caudal no servido en caso de fallo para valorar el Índice de Riesgo de un tramo. Este resultado concuerda con lo que muestran los resultados de la Tabla 25, ya que su coeficiente será nulo con una probabilidad cercana al 90%.

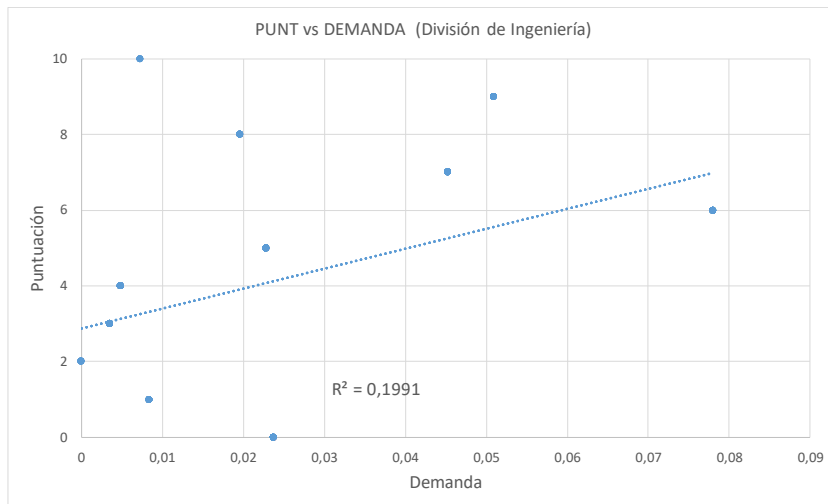


Figura 28: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la demanda no servida en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Puntuación vs Caudal de pluviales

Con el factor “PLUVIALES” ocurre lo mismo que cuando se analizaron todos los cuestionarios. Según la Figura 29, la correlación entre esta variable y la puntuación es ligeramente negativa. La baja consideración que los encuestados le han otorgado explica este comportamiento, lo que queda corroborado con el mal ajuste que se consigue para esta variable ($R^2=0.0215$).

Por tanto, para esta División, el caudal de aguas pluviales no es un criterio relevante en comparación con la probabilidad de fallo, el caudal fugado o el carácter sensible de tramo.

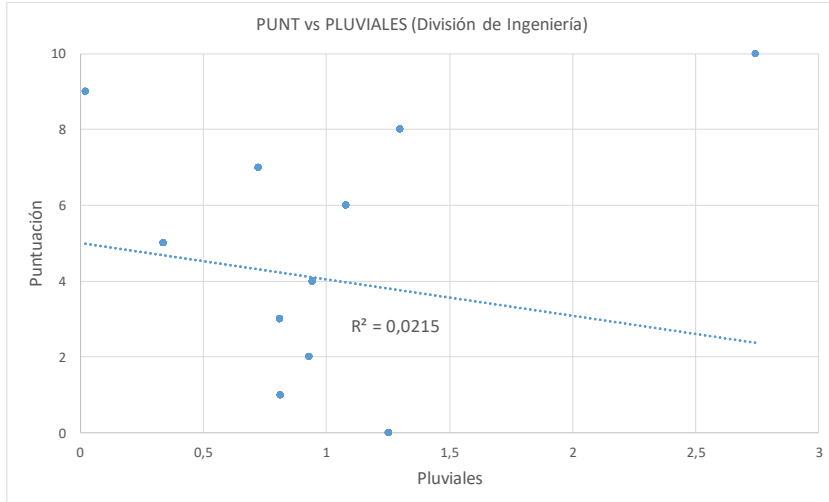


Figura 29: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de aguas pluviales que circula por un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Puntuación vs Caudal fugado

Por lo que se observa en la Figura 30, el subconjunto de encuestados de la División de Ingeniería ha tenido presente, generalmente, el caudal fugado para priorizar las reposiciones. De la misma manera que ocurría con el conjunto total de cuestionarios, la correlación es positiva y con un ajuste notablemente alto ($R^2=0.608$).

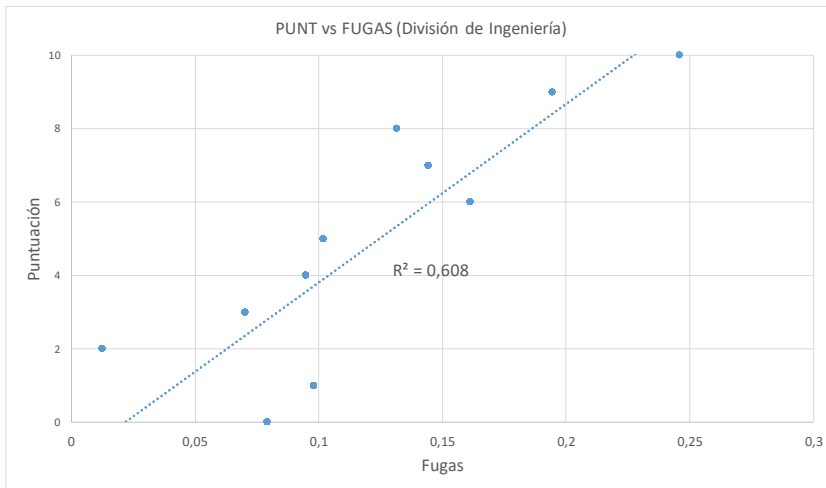


Figura 30: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado a un tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

Puntuación vs Tramo sensible

Finalmente, la puntuación de los tramos sensibles también resulta mayor que los no sensibles. Sin embargo, la División de Ingeniería ha tenido este factor menos presente que el conjunto total de encuestados, pues el coeficiente de correlación obtenido tras analizar todos los encuestados (0.5001) es considerablemente superior al obtenido por esta División (0.1575).

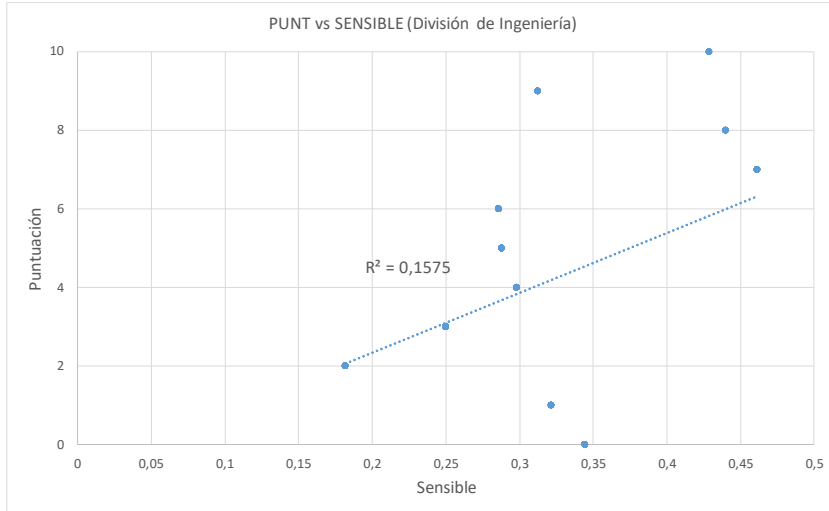


Figura 31: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter de “sensible” de un tramo. Conjunto reducido de variables y para la División de Ingeniería.

3.4.4. Conjunto reducido de variables para los Departamentos de Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos

En este apartado se muestran los resultados del último análisis llevado a cabo. En este estudio se han seleccionado únicamente siete cuestionarios y son los correspondientes a los técnicos de los siguientes departamentos:

- Departamento de Planificación de Infraestructuras (5)
- Sistemas de Información Geográfica (1)
- Calidad Aguas y Modelos (1)

Nuevamente, el primer subapartado muestra los resultados de los cuestionarios de selección, mientras que en el segundo se exponen los de valoración numérica.

3.4.4.1. Cuestionarios de selección

Los resultados de los cuestionarios de selección se reflejan en la Tabla 26. A parte de los valores de los coeficientes, otra información interesante de ella es que todos los factores han resultado ser significativos. La probabilidad de no ser trascendente es prácticamente nula para todos los factores a excepción del caudal fugado ("FUGAS"), cuyo *p-value* es 0.280.

Tabla 26: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	,RESP				No. Observations:	,137
Model:	,Multinomial Logit Model,				Df Residuals:	,132
Method:	,MLE				Df Model:	,5
Pseudo R-squ.:	,0.217				Pseudo R-bar-squ.:	,0.164
AIC:	,158.783				Log-Likelihood:	, -74.391
BIC:	,173.383				LL-Null:	, -94.961
	, coef	, std err	, z	, P> z	, [0.025	, 0.975]
PF	, 64.9339,	14.187,	4.577,	0.000,	37.128,	92.740
DEMANDA	, 5.4876,	2.857,	1.921,	0.055,	-0.113,	11.088
PLUVIALES,	0.2347,	0.113,	2.071,	0.038,	0.013,	0.457
FUGAS	, 1.1260,	1.042,	1.081,	0.280,	-0.916,	3.167
SENSIBLE	, 0.7983,	0.488,	1.636,	0.102,	-0.158,	1.755

En cuanto a la importancia relativa entre los factores, la probabilidad de fallo sigue siendo el factor más determinante en la priorización de reposiciones. Sin embargo, la Figura 32 refleja un comportamiento diferente a los observados en los estudios anteriores.

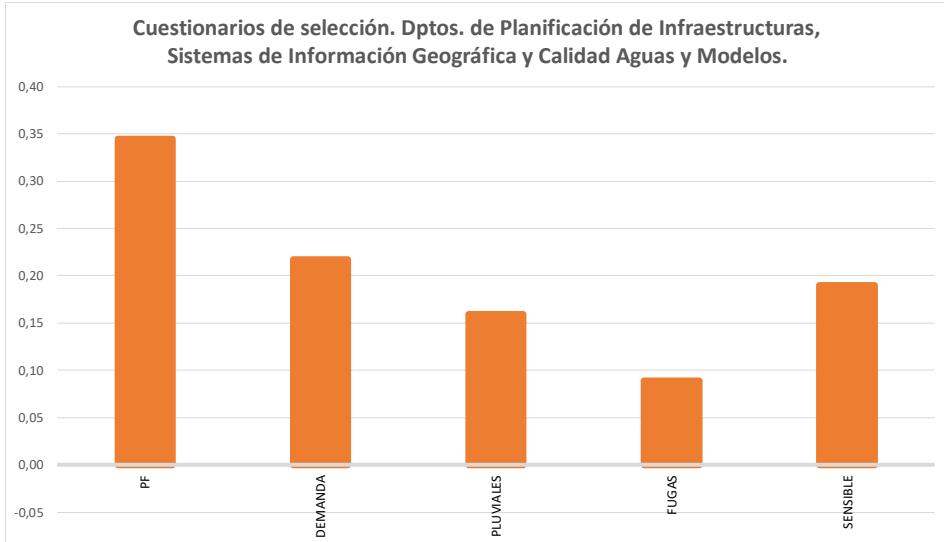


Figura 32: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

En ella se aprecia que los encuestados de estos Departamentos valoran el factor “DEMANDA” especialmente sobre otros técnicos de EMASESA. Según este estudio, el caudal que deja de servirse en caso de fallo tiene una significancia relativa superior al 20%. Lo mismo ocurre con el factor “PUVIALES”, que resulta más influyente respecto a los estudios previos.

Por contrapartida, según elección discreta, los factores “FUGAS” y “SENSIBLE son ser menos trascendentes para estos Departamentos, suponiendo conjuntamente algo menos del 30% del criterio total para priorizar los reemplazos en la red.

3.4.4.2. Cuestionario de valoración numérica

Por último, en la Tabla 27 se recogen los resultados obtenidos en este último estudio. Lo que rápidamente se extrae de ella es que la probabilidad de fallo adquiere un peso

considerablemente superior al de análisis previos. Además, el error estándar de esta variable es notablemente pequeño en comparación con su coeficiente, lo que afirma que es el factor más relevante para los técnicos seleccionados para este estudio.

También se aprecia que el resto de variables “DEMANDA”, “PLUVIALES”, “FUGAS” y “SENSIBLE” son menos trascendentes para este subgrupo de técnicos, pues la probabilidad de que sus coeficientes sean nulos es relativamente alta (*p-value* entre 0.177 y 0.488).

Tabla 27: Resultados de los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	, PUNT			R-squared:		0.314
Model:	, OLS			Adj. R-squared:		0.288
Method:	, Least Squares			F-statistic:		12.17
Prob (F-statistic):	, 1.02e-09			Log-Likelihood:		-310.16
No. Observations:	, 139			AIC:		632.3
Df Residuals:	, 133			BIC:		649.9
Df Model:	, 5					
Covariance Type:	, nonrobust					
	, coef	, std err	, t	, P> t	, [0.025	, 0.975]
const	, 1.7541,	0.336,	5.225,	0.000,	1.090,	2.418
PF	, 87.7412,	11.913,	7.365,	0.000,	64.178,	111.304
DEMANDA	, 2.1216,	2.558,	0.829,	0.408,	-2.938,	7.181
PLUVIALES	, 0.0729,	0.054,	1.356,	0.177,	-0.033,	0.179
FUGAS	, -2.0021,	1.484,	-1.349,	0.180,	-4.937,	0.933
SENSIBLE	, 0.5513,	0.422,	1.305,	0.194,	-0.284,	1.387

Efectivamente, tal y como se observa en la Figura 33, la probabilidad de fallo es el factor más representativo para estos técnicos, condicionando sus decisiones hasta en un 50% según la probabilidad de fallo. El resto de factores, en cambio, adquieren una

relevancia bastante menor, en torno al 10% del criterio total para priorizar los reemplazos en la red.

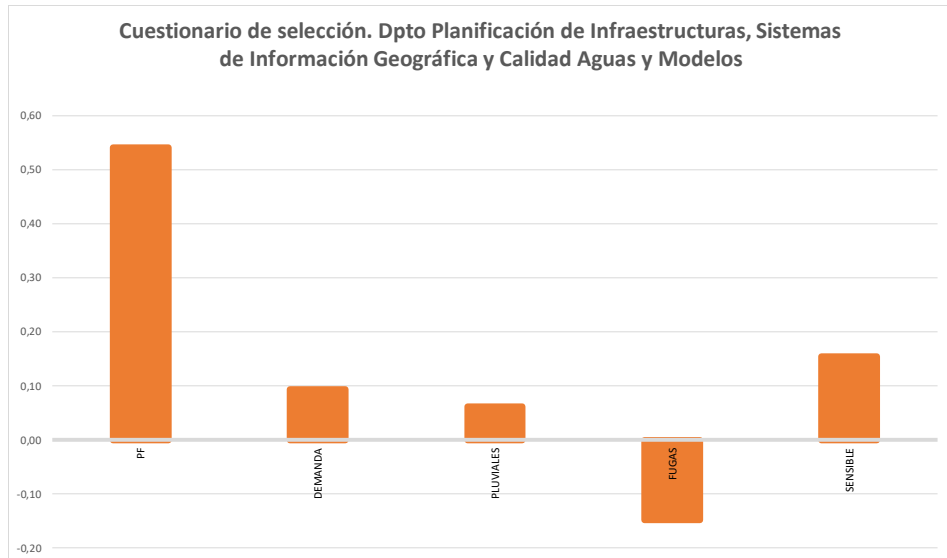


Figura 33: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de valoración numérica. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

Un aspecto que llama la atención en la gráfica es la influencia negativa del caudal fugado en el Índice de Riesgo del tramo. Según el análisis, este factor influye negativamente en la necesidad de reemplazo. Esta circunstancia se debe, primeramente, a la poca significancia del factor. Según la Tabla 27, el coeficiente de la variable “FUGAS” se encontrará, con un 95% de probabilidad, en el rango de valores [-4.937, 0.933], que es un intervalo considerablemente amplio teniendo en cuenta que el valor del coeficiente es -2.0021. Por otro lado, el número de muestras consideradas (únicamente siete cuestionarios) es demasiado reducido para proporcionar un resultado fiable, lo que justifica este comportamiento ilógico.

3.4.4.3. Análisis de correlaciones

Por último, se muestra la correlación existente entre los factores y las puntuaciones otorgadas por esta selección de encuestados.

Puntuación vs Probabilidad de fallo

Como se acaba de comentar, la probabilidad de fallo es el factor más relevante para este subgrupo de técnicos. Así se puede comprobar también en la Figura 34. Ésta presenta un buen ajuste ($R^2=0.8563$), aunque es ligeramente inferior al obtenido para este mismo factor en los dos estudios previos.

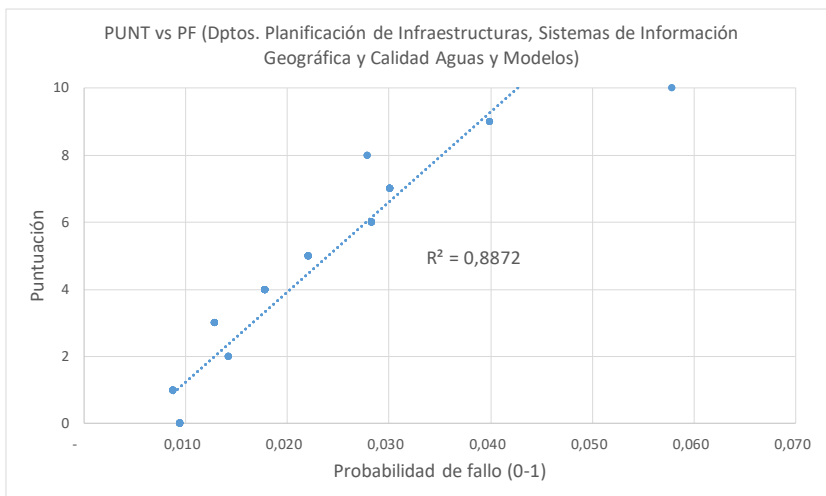


Figura 34: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función de la probabilidad de fallo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. de Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

Puntuación vs Caudal no servido

Según este análisis de regresión lineal, los encuestados de los Departamentos de Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos no han tenido en consideración el caudal que dejaría de servirse en caso de fallo del tramo. Además de la alta probabilidad de ser intrascendente ($p\text{-value} = 0.408$ en la Tabla 27), la correlación entre esta variable y la puntuación es prácticamente nula ($R^2=0.0534$).

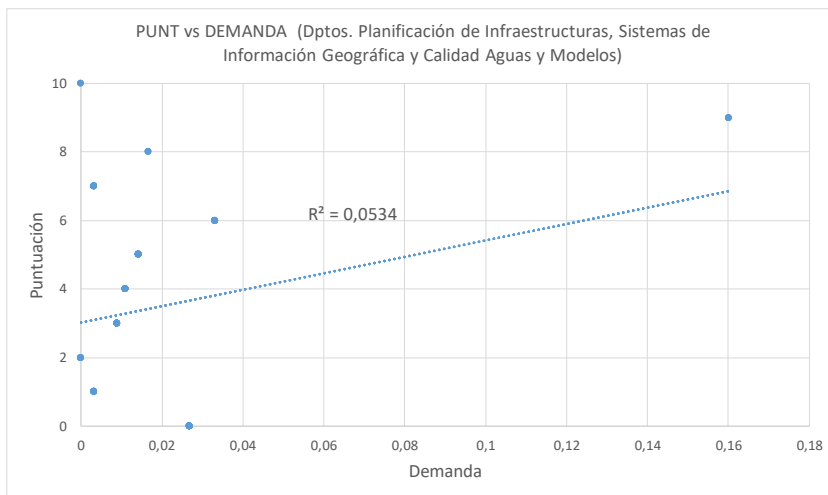


Figura 35: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal no servido en caso de fallo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos

Puntuación vs Caudal de pluviales

Una situación similar ocurre con la variable “PLUVIALES”. La Figura 36 refleja la poca influencia que ha tenido este factor en la decisión según los cuestionarios de valoración numérica.

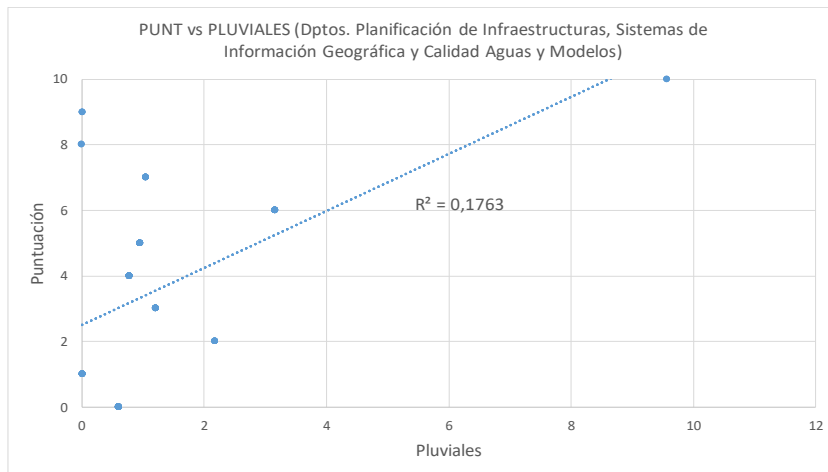


Figura 36: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal máximo de pluviales en un tramo de saneamiento. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

Puntuación vs Caudal fugado

La Figura 37 corrobora, igualmente, que el caudal fugado no ha tenido una gran influencia en la decisión de los encuestados. Una bondad en el ajuste de correlación tan baja ($R^2=0.0058$) confirma la poca significancia de la variable "FUGAS" en este estudio.

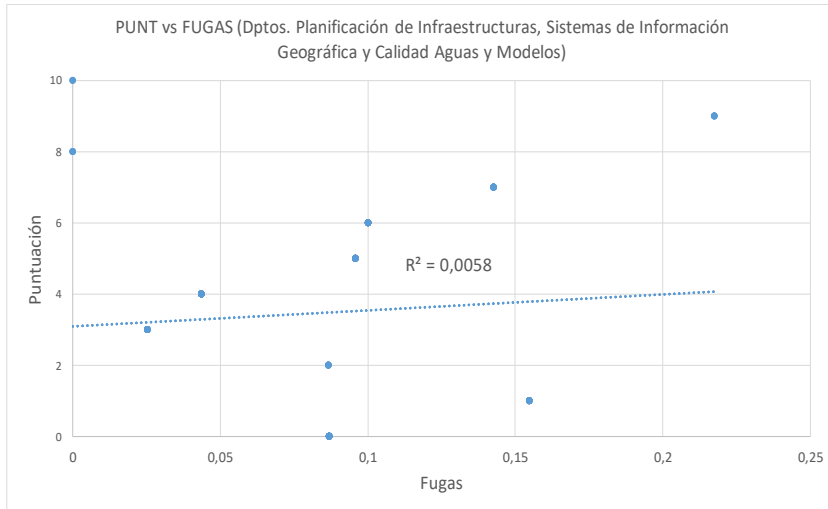


Figura 37: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del caudal fugado asignado al tramo de abastecimiento. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

Puntuación vs Tramo sensible

Finalmente, la Figura 38 permite distinguir una ligera correlación positiva entre el carácter sensible de los tramos y la valoración con la que son puntuados. Sin embargo, estos Departamentos no han tenido tan presente este factor como el conjunto total de encuestados o la División de Ingeniería. El coeficiente de correlación obtenido en este caso es de $R^2=0.1062$.

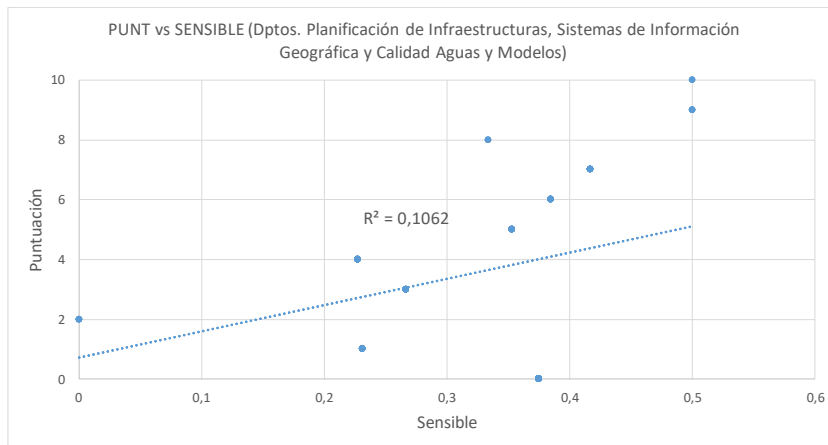


Figura 38: Puntuación otorgada en los cuestionarios de valoración numérica en función del carácter de “sensible” de un tramo. Conjunto reducido de variables y para los Dptos. Planificación de Infraestructuras, Sistemas de Información Geográfica y Calidad Aguas y Modelos.

3.4.5. Ajuste no lineal

Una vez se ha llevado a cabo el análisis de las encuestas desde una perspectiva de linealidad, se plantea el estudio de la influencia no lineal de algunas variables. Esto se debe a que existen algunas variables, como es el caso del caudal máximo de pluviales y la demanda no servida, que tienen una evolución no lineal. Es decir, estas dos variables tienen una evolución sostenida y atenuada, pero existen una serie de puntos que tienen unos valores muy elevados que hacen que la linealidad se pierda.

3.4.5.1. Función basada en logaritmos

Para realizar este tipo de análisis, se modifican los valores de entrada de modo que al caudal máximo de pluviales y a la demanda no servida se les aplica el logaritmo en base 10. De modo que se obtienen unas ponderaciones para cada variable analizada, para poder ajustar la función IR (Índice de Riesgo).

Tras llevar a cabo el análisis de los cuestionarios de selección y aplicando la modificación de no linealidad propuesta, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en logaritmos.

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	,RESP				No. Observations:	,1,356
Model:	,Multinomial Logit Model,				Df Residuals:	,1,351
Method:	,MLE				Df Model:	,5
Pseudo R-squ.:	,0.160				Pseudo R-bar-squ.:	,0.154
AIC:	,1,589.977				Log-Likelihood:	, -789.989
BIC:	, 1,616.039				LL-Null:	, -939.908
		coef	st err	z	P> z	[0.025 , 0.975]
PF	, 48.3800,	3.823,	12.655,	0.000,	40.887,	55.873
DEMANDA	, 0.1239,	0.033,	3.765,	0.000,	0.059,	0.188
PLUVIALES,	0.1457,	0.037,	3.992,	0.000,	0.074,	0.217
FUGAS	, 1.4050,	0.403,	3.485,	0.000,	0.615,	2.195
SENSIBLE	, 0.9752,	0.181,	5.378,	0.000,	0.620,	1.331

Si se observa la tabla anterior, se corrobora como los encuestados han tenido en cuenta todos los parámetros del modelo, debido a que su *p-valor* es igual a cero para todos los coeficientes. Si se representan los valores normalizados que se han obtenido para los coeficientes se observa cómo es la probabilidad de fallo el factor más determinante. Se muestra en la Figura 39.



Figura 39: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en logaritmos.

3.4.5.2. Función basada en raíz cuadrada y cúbica

Para llevar a cabo el análisis, se modifican los valores de entrada de modo que al caudal máximo de pluviales se le aplica la raíz cúbica y a la demanda no servida se le aplica la raíz cuadrada. De modo que se obtienen unas ponderaciones para cada variable analizada, para poder ajustar la función IR (Índice de Riesgo).

Tras llevar a cabo el análisis de los cuestionarios de selección y aplicando la modificación de no linealidad propuesta, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en raíces.

Multinomial Logit Model Regression Results						
Dep. Variable:	,RESP				No. Observations:	,1,356
Model:	,Multinomial Logit Model,				Df Residuals:	,1,351
Method:	,MLE				Df Model:	,5
Pseudo R-squ.:	,0.168	Pseudo R-bar-squ.:	,0.155			
AIC:	,1,573.161				Log-Likelihood:	, -781.581
BIC:	, 1,599.223				LL-Null:	, -939.908
	, coef	, std err	, z	,P> z	, [0.025	, 0.975]
PF	, 50.9612,	3.984,	12.791,	0.000,	43.152,	58.770
DEMANDA	, 1.4523,	0.351,	4.143,	0.000,	0.765,	2.139
PLUVIALES,	0.5975,	0.116,	5.166,	0.000,	0.371,	0.824
FUGAS	, 1.4568,	0.398,	3.665,	0.000,	0.678,	2.236
SENSIBLE	, 1.0422,	0.182,	5.714,	0.000,	0.685,	1.400

De la observación de la tabla anterior se puede afirmar que los encuestados han tenido en cuenta todos los factores del análisis, puesto que ningún factor presenta un *p-value* alto, esto es, la probabilidad de que el coeficiente de alguno de los factores sea nulo es inexistente. Los valores obtenidos para tras el análisis, y que explican el comportamiento del Índice de Riesgo del modelo, se representan en la Figura 40.

Se obtiene que es la probabilidad de fallo el factor que obtiene una mayor importancia seguido del carácter sensible. A continuación, se encuentra como factor relevante el caudal máximo de pluviales y la demanda no servida. Finalmente, se obtiene como último factor las fugas.



Figura 40: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables para todos los encuestados. Func. basada en raíces.

3.4.5.3. Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponencial

Una vez se ha llevado el análisis para la función del Índice de Riesgo basada en logaritmos y en raíces, en este apartado se elabora un análisis mediante el cual se combinan estos adicionándole la función exponencial. En concreto, se han llevado a cabo 14 combinaciones mediante las cuales se le aplica a cada uno de los cinco términos (probabilidad de fallo, demanda, pluviales, fugas y sensible) una transformación basada en raíces, logaritmos y exponenciales.

Para cada una de las combinaciones se ha obtenido una medida de la bondad del ajuste, dada por el valor de R^2 . Se muestra en la Tabla 30 cada una de estas combinaciones, acompañada del valor de ajuste obtenido, así como del Índice de Riesgo máximo, mínimo y promedio. Por último, se muestra la desviación estándar, la moda y la mediana.

Tabla 30: Características del ajuste del IR según combinación de raíces, logaritmos y exponenciales

Combinación	PF	DEM	PLUV	FUGAS	SENSIBLE	R ²	IR max	IR min	IR prom	Dev. estándar IR	Moda IR	Mediana IR
1	x	y	v	w	z	0,161	149,138	0,006	1,932	2,887	1,854	1,695
2	x	raiz(y)	raiz_3(v)	w	z	0,168	13,349	0,007	2,389	1,110	2,217	2,280
3	x	raiz(y)	raiz(v)	w	z	0,169	21,778	0,007	2,305	1,270	2,126	2,137
4	x	ln(y+1)	ln(v+1)	w	z	0,160	12,923	0,006	2,210	0,905	2,122	2,163
5	exp(x)-1	raiz(y)	raiz_3(v)	w	z	0,167	14,386	0,006	2,199	0,968	2,342	2,192
6	exp(x)-1	raiz(y)	ln(v+1)	w	z	0,170	14,386	0,006	2,041	0,984	2,342	1,991
7	exp(x)-1	raiz(y)	ln(v+1)	raiz(w)	z	0,175	15,087	0,007	2,271	1,053	2,483	2,202
8	exp(x)-1	ln(y+1)	ln(v+1)	w	exp(z)-1	0,170	14,476	0,007	2,011	1,051	2,435	1,930
9	exp(x)-1	ln(y+1)	ln(v+1)	w	2z	0,170	14,476	0,007	2,011	1,051	2,435	1,930
10	exp(x)-1	ln(y+1)	ln(v+1)	raiz(w)	z	0,176	15,036	0,007	2,198	1,073	2,490	2,109
11	exp(2x)-1	raiz(y)	ln(v+1)	raiz(w)	z	0,174	16,332	0,007	2,241	1,057	2,448	2,170
12	exp(5x)-1	raiz(y)	ln(v+1)	raiz(w)	z	0,170	21,282	0,006	2,157	1,080	2,340	2,080
13	exp(10x)-1	raiz(y)	ln(v+1)	w	z	0,157	34,648	0,005	1,875	1,146	2,123	1,781
14	((x+1)^3)/3	raiz(y)	ln(v+1)	w	z	0,169	15,518	0,006	2,074	1,033	2,398	2,000

Se puede observar que la combinación que obtiene una mejor bondad en el ajuste, R², es la 10. Es decir, si se le aplica a la probabilidad de fallo la función exponencial, a la demanda no servida y al caudal de pluviales el logaritmo neperiano, a las fugas la raíz cuadrada y dejándose la sensibilidad sin realizar ningún cambio, se obtiene el ajuste que obtiene los mejores resultados. Al igual que se ha mostrado en los apartados anteriores, la Tabla 31 muestra los resultados obtenidos para mejor combinación encontrada.

Tabla 31: Resultados de los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponenciales.

Multinomial Logit Model Regression Results			
Dep. Variable: ,RESP		No. Observations: ,1,356	
Model: ,Multinomial Logit Model,		Df Residuals: ,1,351	
Method: ,MLE		Df Model: ,5	
Pseudo R-squ.: ,0.176		Pseudo R-bar-squ.: ,0.170	
AIC: , 1,559.848		Log-Likelihood: , -774.924	

	BIC:	, 1,585.910	, LL-Null:	, -939.908			
	, coef	, std err	, z	, P> z	, [0.025	, 0.975]	
PF	, 52.3888,	4.057,	12.914,	0.000,	44.438,	60.340	
DEMANDA	, 2.6534,	0.713,	3.723,	0.000,	1.257,	4.050	
PLUVIALES	, 0.7197,	0.122,	5.884,	0.000,	0.480,	0.959	
FUGAS	, 1.2500,	0.258,	4.843,	0.000,	0.744,	1.756	
SENSIBLE	, 1.1023,	0.185,	5.955,	0.000,	0.740,	1.465	

La Figura 41 refleja cómo la probabilidad de fallo el factor con una mayor relevancia, seguido del carácter sensible. Por último, se tienen las fugas, pluviales y la demanda.



Figura 41: Importancia relativa de los factores según los cuestionarios de selección. Conjunto reducido de variables y para todos los encuestados. Función basada en combinación de raíces, logaritmos y exponenciales.

4. CONCLUSIONES

Como se indicó al principio del documento, las redes de abastecimiento y saneamiento de agua son sistemas que, aunque esenciales, envejecen y se degradan con el tiempo. Por otro lado, debido a su magnitud, su mantenimiento y sostenibilidad operativa, económica y social a largo plazo requiere un importante esfuerzo económico.

Para guiar a la empresas gestoras en este objetivo, a lo largo de las últimas décadas se han desarrollado diversas metodologías de gestión patrimonial de infraestructuras (GPI), e incluso algunas se han implementado a través de softwares comerciales.

Sin embargo, estas metodologías también presentan algunas carencias que fueron identificadas en el segundo capítulo de este trabajo. Algunas son:

- La consideración de estrategias de intervención predefinidas, entre las cuales se elige la alternativa más adecuada (Beheshti y Sægrov, 2018; Cardoso *et al.*, 2016a; Carriço *et al.*, 2013; Ferreira y Carriço, 2019; Marques *et al.*, 2012). El principal problema de este enfoque es su complejidad de aplicación a cualquier otra empresa del sector, lo que hace necesaria una metodología más versátil y práctica.
- La ausencia de criterios de adyacencia y agrupación de elementos de red para su reemplazo simultáneo, así como elementos urbanos como calles o intersecciones (Brito *et al.*, 2020; Cabral *et al.*, 2019; Ferreira y Carriço, 2019; Large *et al.*, 2015). Su no inclusión limita a las metodologías de realismo y practicidad, ya que este enfoque no se ajusta a las políticas habituales de las empresas de agua.
- Carencia de restricciones en las asignaciones presupuestarias por distritos o

poblaciones, esenciales para garantizar una distribución justa del presupuesto entre los usuarios. Asimismo, su no consideración puede ser engañosa, resultando en estimaciones insuficientes de las necesidades de inversión.

- La fuerte dependencia de los trabajos existentes en el Índice del valor de la infraestructura, IVI (Cabral *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020). Aunque se trata de una métrica sencilla y potente, la alta influencia de vida útil del activo imprime en él un alto grado de incertidumbre. Así se hace necesario un análisis más completo mediante un conjunto más numeroso y diverso de indicadores.

Así, identificadas estas necesidades de mejora, esta tesis ha consistido en el desarrollo de una metodología GPI que supere las carencias detectadas en los enfoques existentes. Estas propuestas, junto con los principales resultados del trabajo se resumen en el siguiente apartado 4.1. Seguidamente, el apartado 4.2 lista las aportaciones de esta tesis a la literatura en forma de artículos científicos ya publicados, siendo el doctorando coautor en todos ellos. Finalmente, en el apartado 4.3 se esbozan las principales líneas de investigación que se han planteado a raíz de este estudio.

4.1. Resultados y discusión

Con todo lo anterior, este trabajo ha presentado un marco GPI completo y práctico de cinco pasos, que aborda las necesidades identificadas en la discusión anterior y cuya eficacia se ha demostrado con su aplicación a una gran empresa de aguas en España. Los aspectos más destacados han sido:

- 1) El desarrollo de un novedoso Índice de Riesgo para establecer una prioridad de intervención en cada elemento de la red. Para ello, se ha empleado un modelo de sumas ponderadas (MSP). Además, se han considerado cinco

variables: dos de ellas vinculadas al estado de la tubería (probabilidad de fallo y caudal de fuga) y tres a las consecuencias de un posible fallo de ésta (caudal no servido en caso de interrupción, caudal máximo de aguas pluviales por un tramo de saneamiento y su carácter de especial sensibilidad por el cliente que abastece). A su vez, para definir la importancia relativa entre estas variables, se ha empleado la técnica de elección discreta (ED), al ser la que menos subjetividad puede inducir en el problema.

- 2) La definición y utilización de los tramos de calle entre intersecciones como unidad operacional de intervención. Este elemento representa un enfoque más práctico que una tubería u otro elemento hidráulico al adherirse a otros elementos urbanos y cohesionarse mejor con otros posibles proyectos de mantenimiento (gas, luz o pavimento).
- 3) La inclusión de factores de adyacencia y conveniencia de la reposición simultánea, para lo cual se ha desarrollado un algoritmo novedoso de dos fases que genera intervenciones que priorizan la ampliación a lo largo de una única calle, pero también incorpora algunos segmentos de red de otras calles transversales con alta prioridad de reposición. Esta metodología ofrece también gran configurabilidad operativa gracias a un conjunto de cinco parámetros y a un proceso de optimización que permite integrar la política operacional de la compañía en la metodología, lo que la hace versátil y aplicable a cualquier empresa de aguas.
- 4) La incorporación de criterios de distribución presupuestarias entre tipo de red y poblaciones. Estos criterios aportan realismo y practicidad al problema, ya que se ajusta a las estrategias reales de reposición que aplican las empresas de agua. Naturalmente, estos factores también implican alejarse de la solución puramente técnica y económicamente más eficiente: para cumplir los mismos objetivos de sostenibilidad, la no consideración de estos factores en el caso de estudio podría resultar en una reducción de las necesidades de inversión de aproximadamente 2.5 M€ cada año. Sin

embargo, esto no significa que deban evitarse o descartarse. Por el contrario, su no consideración puede conducir a resultados engañosos y a futuros problemas de sostenibilidad de las infraestructuras.

- 5) La utilización de cuatro indicadores eficaces e inequívocos: el IVI, la PF, el IR y la Edad, que ofrecen información completa y diversa sobre el rendimiento de la red. Además, el IR se presenta en este trabajo como una métrica novedosa y práctica que integra todos los factores que influyen en el proceso de toma de decisiones. La necesidad de utilizar cuatro indicadores diferentes surge, entre otras razones, de la consideración de los horizontes de planificación a largo plazo y de la incertidumbre asociada a ciertas métricas, como el IVI (como se ha indicado anteriormente). Por ello, para hacer frente a la incertidumbre asociada a esta métrica, en este trabajo también se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad sobre la vida útil de las tuberías y se ha simulado su respectivo escenario de inversión futura.
- 6) El uso del método de bisección matemática para calcular la cantidad mínima de inversión que garantice el cumplimiento de todos los objetivos de sostenibilidad al final del horizonte de planificación. Esta técnica es más sofisticada que otros enfoques más utilizados y ahorra un importante número de iteraciones innecesarias. Esto es esencial para la viabilidad de la metodología, ya que el algoritmo de formación de obras, que ha de ejecutarse en cada iteración, requiere un importante esfuerzo de cálculo.
- 7) Por último, se ha resaltado la importancia de combinar la solución de planificación inicial con un procedimiento de horizonte rotatorio.

Una vez identificadas las propuestas que ofrece la metodología desarrollada en esta tesis, el siguiente apartado lista los artículos científicos con los que esta tesis ha permitido contribuir a la literatura científica.

4.2. Listado de contribuciones

Este trabajo ha impulsado la redacción y publicación de cuatro artículos científicos en revistas de gran prestigio e impacto. Sus datos de autoría y referencia, así como un breve resumen de su contenido se lista a continuación:

Title	Use of discrete choice to calibrate a combined distribution and sewer pipe replacement model		
Authors	Muñuzuri J., Ramos-Salgado C., Vázquez A., Onieva L.		
Journal	Urban Water Journal	JCR	Q3 (2.081)
Volume	17	Year	2020
Citation	Muñuzuri <i>et al.</i> (2020)		
DOI	https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748205		
Abstract	We present a weighted sum model to calculate the risk index, which is equivalent to a priority index for the replacement of pipes in a network. This index is based on two factors related to pipe condition (probability of failure and supply pipe leakage flow), and three factors related to the consequences of pipe failure (non-served demand for supply pipes, maximum evacuation flow for sewer pipes, and pipe relevance). The procedure encompasses both the supply and sewer networks, to avoid the need for ex ante budget allocations. We tested different configurations for the risk index function terms, and calculated the associated weights by means of a discrete choice experiment. We applied the procedure to a large water company in Spain, where the results were fully accepted as an equilibrium representation of the renovation opinions of its technical staff.		
Relación con la tesis doctoral	La publicación aborda el desarrollo del Índice de Riesgo para priorizar el reemplazo de tramos de red mediante un modelo de sumas ponderadas, y se ha tratado en profundidad en el capítulo 3 de esta tesis.		

Title	Artificial neural networks to forecast failures in water supply pipes
Authors	Robles Velasco A., Ramos Salgado C., Muñuzuri J., Cortés P
Journal	Sustainability JCR Q2 (3.251)
Volume	13 Year 2021
Citation	Robles-Velasco <i>et al.</i> (2021)
DOI	https://doi.org/10.3390/su13158226
Abstract	<p>The water supply networks of many countries are experiencing a drastic increase in the number of pipe failures. To reverse this tendency, it is essential to optimise the replacement plans of pipes. For this reason, companies demand pioneering techniques to predict which pipes are more prone to fail. In this study, an Artificial Neural Network (ANN) is designed to classify pipes according to their predisposition to fail based on physical and operational input variables. In addition, the usefulness and effectiveness of two sampling methods, under-sampling and over-sampling, are analysed. The implementation of the model is done using the open-source software Weka, which is specialised in machine-learning algorithms. The system is tested with a database from a real water network in Spain, obtaining high-accurate results. It is verified that the balance of the training set is imperative to increase the predictions' accurateness. Furthermore, under-sampling prioritises true positive rates, whereas over-sampling makes the system learn to predict failures and non-failures with the same precision.</p>
Relación con la tesis doctoral	<p>El contenido de este artículo no se corresponde directamente con ningún capítulo de esta tesis. No obstante, en él sí se han aplicado los análisis de probabilidad y consecuencias de fallo desarrollados en esta tesis doctoral.</p>

Title	A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs		
Authors	Ramos-Salgado C., Muñuzuri J., Aparicio-Ruiz P., Onieva L.		
Journal	Reliability Engineering and System Safety	JCR	Q1 (6.188)
Volume	216	Year	2021
Citation	Ramos-Salgado <i>et al.</i> (2021)		
DOI	https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107967		
Abstract	<p>Asset management in hydraulic infrastructures aims for the long-term sustainability of water distribution and wastewater networks. Strategic maintenance planning has thus been deeply analyzed in the literature for individual water and sewer pipes. However, water utilities do not plan and perform replacement activities on individual elements, but rather on coherent aggregations of neighboring pipes. We have developed a decision support system (DSS) to help water utilities design intervention programs for hydraulic infrastructures. It integrates a two-stage algorithm that groups water supply and sewer pipes into practical and efficient replacement works, based upon their proximity and their priority of renewal. A multi-objective genetic algorithm optimizes the work programs configurations while integrating the water company's strategic policy into an innovative multi-objective function. We have applied our methodology to a large water company in Spain and illustrated this application with a sensitivity analysis to determine how the company's strategic criteria influences the resulting work configurations.</p>		
Relación con la tesis doctoral	<p>Este artículo científico describe la metodología de agrupación de tramos para elaborar obras de renovación de red coherentes y prácticas en base a criterios de adyacencia y oportunidad. A su vez, dicho desarrollo se corresponde con el capítulo ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. de esta tesis.</p>		

Title	A comprehensive framework to efficiently plan short and long-term investments in water supply and sewer networks		
Authors	Ramos-Salgado C., Muñuzuri J., Aparicio-Ruiz P., Onieva L.		
Journal	Reliability Engineering and System Safety	JCR	Q1 (6.188)
Volume	219	Year	2022
Citation	Ramos-Salgado <i>et al.</i> (2022)		
DOI	https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108248		
Abstract	<p>Water supply and sewer networks are critical infrastructures that provide a basic service to society. However, these systems constantly age and degrade over time. In addition, since network infrastructures are so extensive in length, they require a significant investment in maintenance tasks. Hence, within the context of infrastructure asset management (IAM), accurately defining the most efficient investment planning possible is essential to ensure their long-term sustainability. This paper presents an original five-step comprehensive framework to successfully implement an infrastructure asset management strategy and plan long-term investments. Moreover, this methodology integrates innovative and relevant operational and convenience factors that, while provide the problem both with realism and practicality, have not been addressed so far. To illustrate the usefulness and applicability of this methodology, the case study of a large water company in Spain is presented.</p>		
Relación con la tesis doctoral	<p>Se trata del artículo más reciente y presenta la metodología GPI para elaborar una estrategia de mantenimiento de la red y su plan de inversiones asociado, así como los resultados de su aplicación a la empresa de aguas de Sevilla. Se corresponde con el capítulo ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. de la tesis doctoral.</p>		

4.3. Futuras líneas de investigación

El último apartado de esta tesis discute las posibles futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo, estando las tres primeras están relacionadas al algoritmo de formación de obras (capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

- 1) En primer lugar, se podría incorporar la información del tráfico al proceso de optimización. De esta forma, sería posible configurar las obras de forma que se minimice el impacto en el mismo. Por ejemplo, si se dispusiera de una medida del impacto en el tráfico, un motor de optimización podría evitar que se programen dos obras de intervención diferentes pero cercanas para el mismo año. Además, si se dispusiera de la información sobre el sentido de la marcha y se integrara en la metodología, se podría proporcionar la consecuente redirección del tráfico más conveniente.
- 2) Asimismo, la metodología podría enriquecerse aún más si se considerara la sustitución simultánea de elementos de varias infraestructuras de la red. Por ejemplo, si las redes de abastecimiento, saneamiento, gas, electricidad y carreteras se integraran en un sistema de información unificado, se podría calcular un Índice de Riesgo global para el tramo de calle, como ya plantean Elsayah *et al.* (2014) o Tscheikner-Gratl *et al.* (2016b).
- 3) En tercer lugar, con el objetivo de determinar la importancia que la empresa da a cada término de la función multiobjetivo desarrollada -ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en la página **¡Error! Marcador no definido.**-, el uso de una técnica de toma de decisiones multiobjetivo, como el modelo de suma ponderada (MSP) o el proceso de jerarquía analítica (AHP), puede ser también una dirección prometedora para futuras investigaciones.
- 4) Por último, un enfoque que podría enriquecer aún más la metodología es la consideración de una red dinámica, es decir, “viva” a lo largo del tiempo. El

análisis realizado en este trabajo considera que la longitud de la red será invariable durante los próximos 20 años. Sin embargo, el sistema crecerá en la realidad debido a la incorporación de nuevas tuberías de la red. Puede ser interesante incorporar este factor en la metodología. Especialmente, porque las nuevas tuberías instaladas contribuirán positivamente al estado de la red gracias a su corta edad.

5. REFERENCIAS

- Abu Samra, S., Ahmed, M., Hammad, A., Zayed, T., (2018). Multiobjective Framework for Managing Municipal Integrated Infrastructure. *J. Constr. Eng. Manag.* 144, 04017091. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001402](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001402)
- AEAS, (2015). Jornada sobre renovación de infraestructuras hídricas urbanas. Sevilla.
- Al-Barqawi, H., Zayed, T., (2008). Infrastructure Management: Integrated AHP/ANN Model to Evaluate Municipal Water Mains' Performance. *J. Infrastruct. Syst.* 14, 305-318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2008\)14:4\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:4(305))
- Al-Barqawi, H., Zayed, T., (2006). Assessment model of water main conditions. *Conf. Proc., Pipeline Div. Spec. ...* 40854, 1-8. [https://doi.org/10.1061/40854\(211\)27](https://doi.org/10.1061/40854(211)27)
- Al-Zahrani, M., Abo-Monasar, A., Sadiq, R., (2015). Risk-based prioritization of water main failure using fuzzy synthetic evaluation technique. *J. Water Supply Res. Technol. - Aqua* jws2015051. <https://doi.org/10.2166/aqua.2015.051>
- Albaladejo Pina, I.P., Díaz Delfa, M.T., (2003). Un modelo de elección discreta en la determinación del perfil del turista rural: una aplicación a Murcia. *Cuad. Tur.* 11, 7-19.
- Alegre, H., Coelho, S., (2013). Infrastructure Asset Management of Urban Water Systems 2-26. <https://doi.org/10.5772/51895>
- Alegre, H., Coelho, S., Covas, D., Almeida, M. do C., Cardoso, M.A., (2013). A utility-tailored methodology for integrated asset management of urban water

- infrastructure. *Water Sci. Technol. Water Supply* 13, 8. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.108>
- Alegre, H., Coelho, S.T., (2012). Infrastructure Asset Management of Urban Water Systems. *Water Supply Syst. Anal. - Sel. Top.* <https://doi.org/10.5772/2882>
- Alegre, H., Coelho, S.T., Cardoso, M.A., World, I.W.A., Congress, W., (2012). A utility-tailored methodology for integrated asset management of urban water infrastructure. *World Water*.
- Alegre, H., Vitorino, D., Coelho, S.T., (2014). Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets. *Procedia Eng.* 89, 1428-1436. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.469>
- Alvisi, S., Franchini, M., (2006). Near-optimal rehabilitation scheduling of water distribution systems based on a multi-objective genetic algorithm. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 23, 143-160. <https://doi.org/10.1080/10286600600789300>
- Anbari, M.J., Tabesh, M., Roozbahani, A., (2017). Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *J. Environ. Manage.* 190, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.052>
- Antunes, D., Freitas, R., Antunes, D., Cunha, M. da C., (2012). Multiple-criteria decision analysis for proactive management of risk of water distribution systems. *14th Water Distrib. Syst. Anal. Conf.* 1055-1071.
- Ariaratnam, S.T., MacLeod, C.W., (2002). Financial Outlay Modeling for a Local Sewer Rehabilitation Strategy. *J. Constr. Eng. Manage.* 128, 486-495. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2002\)128:6\(486\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:6(486))
- Arora, P.S., Wilder, J., Diviney, J., Myers, G., Dawson, T., (2015). Denton Wastewater Collection System Asset Management Program Provides Cost Savings And

- Prioritized Approach For O&M And Rehabilitation. Proc. Water Environ. Fed. 2015, 1-23. <https://doi.org/10.2175/193864715819523044>
- Baah, K., Dubey, B., Harvey, R., McBean, E., (2015). A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management. *Sci. Total Environ.* 505, 1011-1017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.040>
- Bakken, T., Sægrov, S., Pietersen, S., Brouckaert, C., (2002). Computer Aided Rehabilitation of Water Networks in an Area Including Informal Settlements.
- Baur, R., Herz, R., (2002). Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. *Water Sci. Technol.* 46, 389-396. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0704>
- Beheshti, M., Sægrov, S., (2018). Sustainability assessment in strategic management of wastewater transport system: a case study in Trondheim, Norway. *Urban Water J.* 15, 1-8. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1363253>
- Bouvard, K., Artus, S., Bérenger, C., Cocquempot, V., Bérenguer, C., Cocquempot, V., (2011). Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping . Application to commercial heavy vehicles. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, 601-610. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.11.009>
- Brito, R.S., Alegre, H., Machado, P., (2020). Strategic asset management approach for planning investment in a large-scale irrigation system. *Water Supply* 20, 2165-2174. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.115>
- Burn, S., Tucker, S., Rahilly, M., Davis, P., Jarrett, R., Po, M., (2003). Asset planning for water reticulation systems - The PARMs model. *Water Sci. Technol. Water Supply* 3, 55-62. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0086>

- Cabral, M., Loureiro, D., Covas, D., (2019). Using economic asset valuation to meet rehabilitation priority needs in the water sector. *Urban Water J.* 16, 205-214. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648528>
- Cardoso, M.A., Almeida, M. do C., Santos Silva, M., (2016a). Sewer asset management planning – implementation of a structured approach in wastewater utilities. *Urban Water J.* 13, 15-27. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1076859>
- Cardoso, M.A., Poças, A., Silva, M.S., Ribeiro, R., Almeida, M. do C., Brito, R.S., Coelho, S., Alegre, H., (2016b). Innovation results of IAM planning in urban water services. *Water Sci. Technol.* 74, 1518-1526. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.291>
- Cardoso, M.A., Santos Silva, M., Coelho, S.T., Almeida, M. do C., Covas, D.I.C.C., (2012). Urban water infrastructure asset management - A structured approach in four water utilities. *Water Sci. Technol.* 66, 2702-2711. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.509>
- Carey, B.D., Lueke, J.S., (2013). Optimized holistic municipal right-of-way capital improvement planning. *Can. J. Civ. Eng.* 40, 1244-1251. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0183>
- Carrico, N., Covas, D., Almeida, M. do C., Alegre, H., (2013). Selection of the best rehabilitation solution using multicriteria decision analysis. *Water asset Manag. Int.* 9, 7-11.
- Carrico, N., Covas, D., Almeida, M.C., Leitão, J.P., Alegre, H., (2012). Prioritization of rehabilitation interventions for urban water assets using multiple criteria decision-aid methods. *Water Sci. Technol.* 66, 1007-1014. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.274>

- Chavarriaga Hernández, L.Á., Montoya, C.M.Á., (2013). Decision making model for the replacement and upgrading of sewer pipes in Colombia ' s Aburrá Valley. *Water asset Manag. Int.* 9, 3-6.
- Chen, T.Y.J., Guikema, S.D., (2020). Prediction of water main failures with the spatial clustering of breaks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 203, 107108. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107108>
- Christodoulou, S., Deligianni, A., Aslani, P., Agathokleous, A., (2009). Risk-based asset management of water piping networks using neurofuzzy systems. *Comput. Environ. Urban Syst.* 33, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.12.001>
- Clark, R.M., Stafford, C.L., Goodrich, J.A., (1982). Water Distribution Systems: A Spatial and Cost Evaluation. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 108, 243-256.
- Coelho, S.T., Vitorino, D., Alegre, H., (2013). AWARE-P: a system-based software for urban water IAM planning, en: LESAM 2013, Sydney, Australia. p. 1700.
- Coelho, S.T., Vitorino, D., Alegre, H., (2012). AWARE-P: A SOFTWARE FOR URBAN WATER INFRASTRUCTURE PLANNING 1-10.
- D'Ercole, M., Righetti, M., Raspati, G.S., Bertola, P., Ugarelli, R.M., (2018). Rehabilitation planning of water distribution network through a reliability-based risk assessment. *Water* (Switzerland) 10. <https://doi.org/10.3390/w10030277>
- Dandy, G.C., Engelhardt, M., (2001). Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. *Water Resour. Plan. Manag.* 127, 214-223.

- Dandy, G.C., Engelhardt, M.O., (2006). Multi-Objective Trade-Offs between Cost and Reliability in the Replacement of Water Mains. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 132, 79-88.
- De Gueldre, G., Herzele, F. Van, Boonen, I., Thoeye, C., Steene, B. Van De, (2007). Hydroplan-EU: An integrated approach for sewer asset management
Hydroplan-EU : Un outil intégré pour la gestion des égouts. *Novatech* 1-8.
- De Silva, D., Burn, S., Tjandraatmadja, G., Moglia, M., Davis, P., Wolf, L., Held, I., Vollertsen, J., Williams, W., Hafskjold, L., (2005). Sustainable management of leakage from wastewater pipelines. *Water Sci. Technol.* 52, 189-198.
<https://doi.org/10.2166/wst.2005.0459>
- Deb, A.K., Herz, R.K., (1988). Quantifying Future Rehabilitation and Replacement Needs of Water Mains. Final Rep. AWWARF Res. Proj. 265, AWWARF.
- Dekker, R., (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 51, 229-240.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00076-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00076-3)
- Dimzon, M., González, F., Poosti, A., Hagekhalil, A., Heath, E., Ray, R., Breen, E., (2015). The New Age for Sewer Planning at the City of Los Angeles 1353-1359.
- dos Santos Amorim, J.M.B., Bezerra, S. de T.M., Silva, M.M., de Sousa, L.C.O., (2020). Multicriteria Decision Support for Selection of Alternatives Directed to Integrated Urban Water Management. *Water Resour. Manag.* 34, 4253-4269.
<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02671-9>
- Dridi, L., Parizeau, M., Mailhot, A., Villeneuve, J.P., (2008). Using evolutionary optimization techniques for scheduling water pipe renewal considering a short planning horizon. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 23, 625-635.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00564.x>

- El-Abbasy, M.S., El Chanati, H., Mosleh, F., Senouci, A., Zayed, T., Al-Derham, H., (2016). Integrated performance assessment model for water distribution networks. *Struct. Infrastruct. Eng.* 12, 1505-1524. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1144620>
- El Chanati, H., El-Abbasy, M.S., Mosleh, F., Senouci, A., Abouhamad, M., Gkountis, I., Zayed, T., Al-Derham, H., (2016). Multi-Criteria Decision Making Models for Water Pipelines. *J. Perform. Constr. Facil.* 30, 04015090. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000842](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000842)
- Elsawah, H., Bakry, I., Moselhi, O., (2016). Decision support model for integrated risk assessment and prioritization of intervention plans of municipal infrastructure. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000245)
- Elsawah, H., Guerrero, M., Moselhi, O., (2014). Decision support model for integrated intervention plans of municipal infrastructure. *ICSI 2014 Creat. Infrastruct. a Sustain. World - Proc. 2014 Int. Conf. Sustain. Infrastruct.* 1039-1050. <https://doi.org/10.1061/9780784478745.098>
- Engelhardt, M., Skipworth, P., Savic, D., Saul, a. ., Walters, G., (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water* 2, 153-170. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00053-4)
- Ferreira, B., Carriço, N., (2017). Urban Water Infrastructure Asset Management Plan: A Practical Application. *15th Comput. Control Water Ind. (CCWI2017)*. 2013, 1-8.
- Ferreira, B., Carriço, N.J.G., (2019). Urban Water Infrastructure Asset Management Plan: Case Study. *Open Eng.* 9, 459-467. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0058>

- Ferreira, N., Cunha, R., Ferreira da Cruz, N., Cunha Marques, R., da Cruz, N., Marques, R., (2013). A multi-criteria model to determine the sustainability level of water services. *Water asset Manag. Int.* 9, 16-20.
- Fontana, M., (2015). Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil.
- Fontana, M.E., Morais, D.C., (2013). Using Promethee V to Select Alternatives so as to Rehabilitate Water Supply Network with Detected Leaks. *Water Resour. Manag.* 27, 4021-4037. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0393-1>
- Francisque, A., Tesfamariam, S., Kabir, G., Haider, H., Reeder, A., Sadiq, R., (2017). Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach. *Urban Water J.* 14, 493-501. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223321>
- García, F.P., Ivars, M.M., Martínez, L.S., Jiménez, E.U., Candau, E.B., Domínguez, J.C.R., (2019). El stock de capital en España y sus comunidades autónomas: Evolución de la edad media de las inversiones y envejecimiento del capital.
- Ghandi, M., Roozbahani, A., (2020). Risk Management of Drinking Water Supply in Critical Conditions Using Fuzzy PROMETHEE V Technique. *Water Resour. Manag.* 34, 595-615.
- Giustolisi, O., Laucelli, D., Savic, D.A., (2006). Development of rehabilitation plans for water mains replacement considering risk and cost-benefit assessment. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 23, 175-190. <https://doi.org/10.1080/10286600600789375>
- Hafskjold, L.S., Kønig, A., Sægrov, S., Schilling, W., Saegrov, S., Schilling, W., (2002). Improved assessment of sewer pipe condition. *CityNet 19th Eur. Jr. Sci. Work. Process Data Integr. Urban Water Model.* 1-8.

- Herz, R., (2002). Developing rehab strategies for drinking water networks,. Proc. 9 DBMC Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components 11.
- Herz, R.K., (1998). Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. J. Water Supply Res. Technol. - AQUA 47, 275-283.
- Herz, R.K., (1996). Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water. J. Water Supply Res. Technol.
- Herz, R.K., Lipkow, A.T., (2003). Strategic water network rehabilitation planning. Water Sci. Technol. Water Supply 3, 35-42. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0083>
- Hong, H.P., Allouche, E.N., Trivedi, M., (2006). Optimal Scheduling of Replacement and Rehabilitation of Water Distribution Systems. J. Infrastruct. Syst. 12, 184-191. <https://doi.org/10.1287/opre.11.5.732>
- Innovyze, (2018). Gestión y Planificación del Mantenimiento de Activos , Redes de Distribución y Saneamiento , integrado sobre ArcGIS [WWW Document]. URL <http://www.innovyze.com/products/infomaster/>
- Inza, F.S.M., Iriso, E.S., Hita, J.M.C., (2008). Instrumentos económicos para la priorización de pacientes en lista de espera: La aplicación de modelos de elección discreta. Gac. Sanit. 22, 90-97. <https://doi.org/10.1157/13119315>
- Jadranka, M., Ugarelli, R., Federico, V. Di, Maglionico, M., Liserra, T., Nascetti, D., Pacchioli, M., Freni, G., Pollert, J., (2003). CARE-S: Computer Aided REhabilitation of Sewer networks. Decision Support Tools for Sustainable Sewer Network Management.

- Jara-Arriagada, C., Stoianov, I., (2021). Pipe breaks and estimating the impact of pressure control in water supply networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 210, 107525. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107525>
- Jayaram, N., Srinivasan, K., (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resour. Res.* 44, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2006WR005316>
- Kabir, G., Sadiq, R., Tesfamariam, S., (2014). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Struct. Infrastruct. Eng.* 10, 1176-1210. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
- Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A., Sadiq, R., (2015). Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. *Eur. J. Oper. Res.* 240, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.033>
- Kane, G., Zhang, D., Lynch, D., Bendeli, M., (2014). SydneyWater's critical water main strategy and implementation - a quantitative, triple-bottom line approach to risk based asset management. *Water asset Manag. Int.* 10, 19-24.
- Kerwin, S., Adey, B.T., (2020). Optimal Intervention Planning: A Bottom-Up Approach to Renewing Aging Water Infrastructure. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001217](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001217)
- Kielhauser, C., Adey, B.T., (2018). Determination of intervention programs for multiple municipal infrastructure networks: considering network operator and service costs. *Sustain. Resilient Infrastruct.* 5, 49-61. <https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1497879>
- Kielhauser, C., Adey, B.T., Lethanh, N., (2016). Investigation of a static and a dynamic neighbourhood methodology to develop work programs for multiple close

- municipal infrastructure networks. *Struct. Infrastruct. Eng.* 13, 361-389. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1162818>
- Kiliç, Y., Özdemir, Ö., Orhan, C., Firat, M., (2018). Evaluation of technical performance of pipes in water distribution systems by analytic hierarchy process. *Sustain. Cities Soc.* 42, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.035>
- Kleiner, Y., Adams, B.J., Rogers, J.S., Kleiner, Y., Adams, B.J., (2001). Water distribution network renewal planning. *J. Comput. Civ. Eng.* 15, 15-26. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2001\)15:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:1(15))
- Kleiner, Y., (2013). Simultaneous optimization of pipe and pavement renewal scheduling. *World Environ. Water Resour. Congr. 2013 Showcasing Futur. - Proc. 2013 Congr.* 967-974. <https://doi.org/10.1061/9780784412947.093>
- Kleiner, Y., Adams, B.J., Rogers, J.S., (1998a). Selection and Scheduling of Rehabilitation for Water Distribution Systems. *Water Resour. Res.* 34, 2053-2061. <https://doi.org/10.1029/98WR01281>
- Kleiner, Y., Adams, B.J., Rogers, J.S., (1998b). Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resour. Res.* 34, 2039-2051. <https://doi.org/10.1029/98WR00377>
- Kleiner, Y., Nafi, A., Rajani, B., (2010). Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure. *Water Sci. Technol. Water Supply* 10, 897-906. <https://doi.org/10.2166/ws.2010.571>
- Large, A., Le Gat, Y., Elachachi, S.M., Renaud, E., Breyse, D., Tomasian, M., Gat, Y. Le, Elachachi, S.M., Renaud, E., Breyse, D., Tomasian, M., (2015). Improved modelling of «long-term» future performance of drinking water pipes. *J. Water*

Supply Res. Technol. - AQUA 64, 404-414.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2015.115>

Le Gat, Y., (2003). Degradation models for drain and sewer pipelines parameterised with CCTV Inspection Data.

Li, F., Ma, L., Sun, Y., Mathew, J., (2016). Optimized Group Replacement Scheduling for Water Pipeline Network. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 142, 1-10.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000559](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000559)

Li, F., Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., (2011). A grouping model for distributed pipeline assets maintenance decision. *ICQR2MSE 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Qual. Reliab. Risk, Maintenance, Saf. Eng.* 601-606.
<https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2011.5976684>

Li, S., Wang, R., Wu, W., Sun, J., Jing, Y., (2015). Non-hydraulic factors analysis of pipe burst in water distribution systems. *Procedia Eng.* 119, 53-62.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.853>

Loureiro, D., Alegre, H., Silva, M.S., Ribeiro, R., Mamade, A., Poças, A., (2015). Implementing tactical plans to improve water-energy loss management.

Mailhot, A., Poulin, A., Villeneuve, J.P., (2003). Optimal replacement of water pipes. *Water Resour. Res.* 39, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2002WR001904>

Mamo, T.G., (2015). Risk-based approach to manage aging urban water main infrastructure. *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA* 64, 260-269.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2014.052>

Marlow, D.R., Beale, D.J., Mashford, J.S., (2012). Risk-based prioritization and its application to inspection of valves in the water sector. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 100, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.014>

- Marques, J., Saramago, A., Silva, M., Paiva, C., Coelho, S, Pina, A., Oliveira, S., Teixeira, J., Camacho, P., Coelho, ST, Leitão, J., (2012). Rehabilitation in Oeiras & Amadora: a practical approach. *Water asset Manag. Int.* 8, 19-24.
- Marques, M.J., Saramago, A.P., Silva, M.H., Paiva, C., Coelho, S., Pina, A., Oliveira, S.C., Teixeira, J.P., Camacho, P.C., (2011). Rehabilitation in Oeiras & Amadora : apractical approach, en: LESAM 2011 - Leading Edge Conference on Strategic Asset Management.
- Márquez, L.G., Monsalve, H.J., (2009). Modelo de demanda para un tren de pasajeros entre Tunja y Bogotá. 16-24.
- Marzouk, M., Hamid, S.A., El-Said, M., (2015). A methodology for prioritizing water mains rehabilitation in Egypt. *HBRC J.* 11, 114-128. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.03.002>
- Meggeneder, M., Kropp, I., (2010). Development of a pragmatic rehabilitation strategy for a rural water supply network. *Water asset Manag. Int.* 6, 3-6.
- Metelka, T., Svitak, Z., (2010). Rehabilitation strategies in wastewater networks as combination of operational , property and model information. *NOVATECH* 1-10.
- Moglia, M., Burn, S., Meddings, S., (2006). Decision support system for water pipeline renewal prioritisation. *Electron. J. Inf. Technol. Constr.* 11, 237-256.
- Moglia, M., Burn, S., Meddings, S., (2005). Parms-Priority : A methodology for water pipe replacement. *Pipes Wagga Wagga* 17-21.
- Monteiro, A.J., Silva, A.T., Sereno, J., Marçal, L., Franco, A.B., (2008). Scheduling the renewal of a water supply distribution system – a case study in Portugal. *Water asset Manag. Int.* 4, 8-13.

- Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., González Pozo, V., (2002). Introducción al análisis de regresión lineal. Patria Cultural.
- Morais, D.C., de Almeida, A.T., (2007). Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 441-459. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.008>
- Muñuzuri, J., Ramos, C., Vázquez, A., Onieva, L., (2020). Use of discrete choice to calibrate a combined distribution and sewer pipe replacement model. *Urban Water J.* 17, 100-108. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748205>
- Nafi, A., Kleiner, Y., (2010). Scheduling Renewal of Water Pipes While Considering Adjacency of Infrastructure Works and Economies of Scale. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 136, 519-530. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000062](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000062)
- Nafi, A., Werey, C., Llerena, P., (2008). Water pipe renewal using a multiobjective optimization approach. *Can. J. Civ. Eng.* 35, 87-94. <https://doi.org/10.1139/L07-075>
- Pagano, A., Giordano, R., Vurro, M., (2021). A Decision Support System Based on AHP for Ranking Strategies to Manage Emergencies on Drinking Water Supply Systems. *Water Resour. Manag.* 35, 613-628. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02741-y>
- Park, S.W., Loganathan, G. V., (2002). Methodology for economically optimal replacement of pipes in water distribution systems: 1. Theory. *KSCE J. Civ. Eng.* 6, 545-550. <https://doi.org/10.1007/bf02842007>
- Pérez, M.A., Perdomo, M.C., (2011). Herramientas para la toma de decisiones en la gestión de alcantarillados: Perspectivas de implementación en la EAAB.

- Phan, H.C., Dhar, A.S., Hu, G., Sadiq, R., Chi, H., Sutra, A., Hu, G., Sadiq, R., (2019). Managing water main breaks in distribution networks—A risk-based decision making. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 191, 106581. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106581>
- Pompilio Sartori, J.J., (2006). Diseño de un experimento de preferencias declaradas para la elección de modo de transporte urbano de pasajeros. *Rev. Econ. y Estadística XLIV*, 43.
- Ponz Carcelén, R., Salguero Barceló, F.J., (2017). Metodología para la implantación y operación de la gestión patrimonial de infraestructuras. *Experiencias de Global Omnium*.
- Popawala, R., Shah, N.C., (2014). Condition Assessment Model for Underground Water Mains Performance. *J. Inst. Eng. Ser. A* 95, 195-201. <https://doi.org/10.1007/s40030-014-0090-y>
- Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J., Aparicio-Ruiz, P., Onieva, L., (2022). A comprehensive framework to efficiently plan short and long-term investments in water supply and sewer networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 219. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108248>
- Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J., Aparicio-Ruiz, P., Onieva, L., (2021). A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 216, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107967>
- Rasoulkhani, K., Mostafavi, A., Cole, J., Sharvelle, S., (2019). Resilience-based infrastructure planning and asset management: Study of dual and singular water distribution infrastructure performance using a simulation approach. *Sustain. Cities Soc.* 48, 101577. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101577>

- Robles-Velasco, A., Cortés, P., Muñuzuri, J., Onieva, L., (2020). Prediction of pipe failures in water supply networks using logistic regression and support vector classification. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 196, 106754. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106754>
- Robles-Velasco, A., Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J., Cortés, P., (2021). Artificial neural networks to forecast failures in water supply pipes. *Sustain.* 13, 13-14. <https://doi.org/10.3390/su13158226>
- Rodríguez, M., (2017). Análisis de las aplicaciones de las tecnologías de la información a la logística y criterios de decisión en las inversiones.
- Rogers, P.D., Grigg, N.S., (2009). Failure Assessment Modeling to Prioritize Water Pipe Renewal: Two Case Studies. *J. Infrastruct. Syst.* 15, 162-171. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2009\)15:3\(162\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2009)15:3(162))
- Rokstad, M.M., Ugarelli, R.M., (2015). Minimising the total cost of renewal and risk of water infrastructure assets by grouping renewal interventions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 142, 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.05.014>
- Roshani, E., Fillion, Y.R., (2014). Event-based approach to optimize the timing of water main rehabilitation with asset management strategies. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 140, 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000392](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000392)
- Rossmann, F., (2017). EPANET 2.0 en Español: Analisis Hidraulico y de Calidad del Agua en Redes de Distribución de Agua. Manual del Usuario.
- Roy, B., (1991). THE OUTFRANKING FOUNDATIONS APPROACH AND THE METHODS 49-73.
- Roy, B., (1968). Classement Et Choix En Presence De Points De Vue Multiples. *Rev. française d'informatique Rech. opérationnelle* 2, 57-75.

- Ruiz, J., (2015). Métodos De Decisión Multicriterio Electre Y Topsis Aplicados a La Elección De Un Dispositivo Móvil 116.
- Ruwanpura, J., Ariaratnam, S.T., El-Assaly, A., (2004). Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 21, 169-185. <https://doi.org/10.1080/10286600410001694192>
- Saaty, T.L., (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* 1, 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Saaty, T.L., (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Eur. J. Oper. Res.* 48, 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saegrov, S., (2006). Computer aided rehabilitation for water and storm water networks, en: European Comission, Community research IWA Publishing.
- Sægrov, S., König, A., Mattick, A., Milina, J., Röstum, J., Selseth, I., (2003). Methods for estimating water network rehabilitation needs. *Water Sci. Technol. Water Supply* 3, 63-69.
- Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M., Tabesh, M., (2018). A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. *Struct. Infrastruct. Eng.* 14, 743-765. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1359633>
- Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M., Tabesh, M., Valadi, S., Salamati Nia, S.P., (2020). A risk component-based model to determine pipes renewal strategies in water distribution networks. *Struct. Infrastruct. Eng.* 1-22. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1842466>
- Sánchez, H., Casquero, A., (2015). Metodología para la renovación eficiente de redes basada en riesgo de discontinuidad del servicio.

- Shahata, K., Zayed, T., (2016). Integrated risk-assessment framework for municipal infrastructure. *J. Constr. Eng. Manag.* 142, 04015052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001028)
- Shahata, K., Zayed, T., (2013). Simulation-based life cycle cost modeling and maintenance plan for water mains. *Struct. Infrastruct. Eng.* 9, 403-415. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.552509>
- Shamir, U., Howard, C., (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *AWWA*.
- Shanaghan, P.E., (2012). Assessing drinking water infrastructure need. *J. Am. Water Works Assoc.* 104, 14-15. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2012.104.0107>
- Sheu, S.H., Liu, T.H., Sheu, W.T., Zhang, Z.G., Ke, J.C., (2021). Optimal replacement policy with replacement last under cumulative damage models. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 209, 107445. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107445>
- Syan, C.S., Ramsoobag, G., (2019). Maintenance applications of multi-criteria optimization: A review. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 190, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106520>
- Torterotot, J., (2005). Rehabilitation of water networks: Decision making processes of the Care-W Project. *Tech. Issue 1*, 2005.
- Trojan, F., Morais, D.C., (2012). Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach. *Water SA* 38, 555-564. <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i4.11>
- Tscheikner-Gratl, F., Egger, P., Rauch, W., Kleidorfer, M., (2017). Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water (Switzerland)* 9. <https://doi.org/10.3390/w9020068>

- Tscheikner-Gratl, F., Sitzenfrei, R., Rauch, W., Kleidorfer, M., (2016a). Integrated rehabilitation planning of urban infrastructure systems using a street section priority model. *Urban Water J.* 13, 28-40. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1057174>
- Tscheikner-Gratl, F., Sitzenfrei, R., Rauch, W., Kleidorfer, M., (2016b). Enhancement of limited water supply network data for deterioration modelling and determination of rehabilitation rate. *Struct. Infrastruct. Eng.* 12, 366-380. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1017730>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), (2012). Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems. <https://doi.org/EPA/600/R-12/017>
- Urrea-Mallebrera, M., Altarejos-García, L., García-Bermejo, J., Collado-López, B., (2019). Condition assessment of water infrastructures: Application to Segura River Basin (Spain). *Water* 11, 1-21. <https://doi.org/10.3390/w11061169>
- Vanreenterghem-Raven, A., (2007a). Experiences from the application of care-w, computer aided rehabilitation of water networks, en: *Proceedings of the Combined International Conference of Computing and Control for the Water Industry, CCWI2007*. pp. 17-21.
- Vanreenterghem-Raven, A., (2007b). Asset management best practices the rehabilitation of the LVVWD distribution, en: *American Water Works Association - AWWA Annual Conference and Exposition, 2007*. pp. 1-20.
- Vanreenterghem-Raven, A., (2006). WATER PIPES ASSET MANAGEMENT : EVALUATION OF EU CARE-W Performance indicators (CARE-W PIs) Long Term Planning (CARE-W LTP) 1-13.

- Vieira, J., Cabral, M., Almeida, N., Silva, J.G., Covas, D., (2020). Novel methodology for efficiency-based long-term investment planning in water infrastructures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 16, 1654-1668. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1722715>
- Volta, M., Poulton, M., Herrero, M., (2004). CARE-W WP6 - Testing and validation of CARE-W Rehab Manager.
- Walski, T., Pelliccia, A., (1982). Economic analysis of water main breaks. *Am. Water Work. Assoc.* 74, 140-147.
- Walski, T.M., (1987). Replacement Rules for Water Mains. *Am. Water Work. Assoc.* 79, 33-37. <https://doi.org/10.2307/41290738>
- Wang, Z., Li, S., (2020). Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 196. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106781>
- Wiser Analysis, (2016). PARMS: Pipeline Asset & Risk Management System. Water infrastructure systems, economics and risk analysis.
- Yin, X., Chen, Y., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., (2020). Data-driven bi-level sewer pipe deterioration model: Design and analysis. *Autom. Constr.* 116, 103181. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103181>
- Zayed, T., Mohamed, E., (2013). Budget allocation and rehabilitation plans for water systems using simulation approach. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 36, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.004>
- Zio, E.Ã., (2009). Reliability engineering : Old problems and new challenges. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 94, 125-141. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.06.002>