

DOBLE GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA Y
ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

TRABAJO FIN DE GRADO

MODELO DIGITAL DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE VITORIA-GASTEIZ

Alumno: Martínez, Diez, Lander

Director UPV/EHU (1): Sanchez, Ruiz, Alain

Director UPV/EHU (2): Carrascal, Lecumberri, Edorta

Director AMVISA: Dorronsoro, Mendiguren, Carlos

Curso: <2023-2024>

Fecha: Vitoria-Gasteiz, 11 de julio de 2024

Abstract

Resumen

El Trabajo de Fin de Grado se centra en el modelo digital de la red de distribución de agua del municipio de Vitoria-Gasteiz, gestionada por AMVISA. Utilizando las herramientas de QGISRed, EPANET Y QGIS, se efectúa una actualización del modelo y se logra una herramienta fundamental que abre la puerta a un futuro gemelo digital. Se realiza una comparación entre los modelos antiguo y actual y se evalúan parámetros como las presiones, velocidades y pérdidas de carga totales y unitarias obtenidas a través del modelo. También se lleva a cabo un análisis en profundidad de estos parámetros en la red actual. Finalmente, se presentan un caso de estudio relevante y un análisis de estrés de la red antes de exponer las conclusiones y las líneas futuras.

Descriptor: Modelo Digital, Red de Distribución de Agua, Vitoria-Gasteiz.

Laburpena

Gradu Amaierako Lanak AMVISAK kudeatzen duen Vitoria-Gasteizko udalerriko uraren banaketa sarearen eredu digitala du ardatz. QGISRed, EPANET eta QGIS tresnak erabiliz, eredu eguneratzen da funtsezko tresna bat lortuz, etorkizun biki digital baterako atea irekitzen duena. Eredu zaharrak eta egungoak alderatzen dira, eta ereduaren bidez lortutako presioak, abiaduraak eta karga galera totalak eta unitarioak bezalako parametroak ebaluatzen dira. Halaber, parametro horien azterketa zehatza egiten da sare eguneratuan. Azkenik, kasu-azterketa garrantzitsu bat eta sarearen estresaren análisis bat aurkezten dira, ondorioak eta etorkizuneko norabideak azaldu aurretik.

Deskriptoreak: Eredu Digitala, Ura Banaketa Sarea, Vitoria-Gasteiz.

Abstract

The Final Degree Project focuses on the digital model of the water distribution network of the municipality of Vitoria-Gasteiz, managed by AMVISA. Using the QGISRed, EPANET and QGIS tools, an update of the model is carried out and a fundamental tool that opens the door to a future digital twin is achieved. A comparison is made between the old and current models and parameters such as pressures, velocities and total and unit head losses obtained through the model are evaluated. A detailed analysis of these parameters in the current network is also carried out. Finally, a relevant case of study and a stress analysis of the network are presented before conclusions and future directions are displayed.

Keywords: Digital Model, Water Distribution Network, Vitoria-Gasteiz.

Índice

Resumen.....	1
Laburpena	1
Abstract	1
1 Introducción	7
1.1 Contexto	7
1.2 Objetivos y alcance	8
1.3 Estructura del TFG	9
2 Marco teórico.....	11
2.1 Gemelo digital (GD)	11
2.2 Softwares y herramientas utilizadas en el modelo.....	15
2.3 Red de distribución de agua	18
2.4 Fundamentos mecánicos de redes hidráulicas a presión.....	22
2.5 Infraestructura AMVISA.....	29
3 Situación de partida de la red de abastecimiento 2010	31
3.1 Red inicial.....	31
3.2 Elementos de la red	32
4 Proceso de actualización.....	40
4.1 Actualización de trazado.....	41
4.2 Actualización de demanda.....	44
5 Análisis RDA actualizada y comparación.....	50
5.1 Demanda de caudal total.....	50
5.2 Presiones.....	51
5.3 Pérdidas de carga.....	53
5.4 Velocidades.....	57
6 Casos prácticos red actual.....	59
6.1 Zona de Abastecimiento de Mandojana.....	59
6.2 Análisis de estrés de la red de Vitoria Gasteiz.....	61

7	Mención ODS, Diagrama de Gantt y Presupuesto	64
7.1	Mención ODS	64
7.2	Planificación temporal	65
7.3	Presupuesto	66
8	Conclusiones y líneas futuras	68
8.1	Conclusiones	68
8.2	Líneas Futuras	69
9	Bibliografía	71
10	Anexos	76
Anexo I.	Datos de entrada QGISRed	76
Anexo II.	Caudales de la red actualizada	78
Anexo III.	Barrios de Vitoria-Gasteiz	79
Anexo IV.	Red Goikolarra, Arechavaleta y Gardelegi	80
Anexo V.	Demandas Salburua	81
Anexo VI.	Mapas análisis y comparación de red	83

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Estructura de un GD de una RDA. Fuente: [9].</i>	13
<i>Figura 2. Logo QGIS. Fuente: [16].</i>	15
<i>Figura 3. Logo EPANET. Fuente: [18].</i>	16
<i>Figura 4. Explicación de QGISRed.</i>	17
<i>Figura 5. Esquema red de la red de distribución de Vitoria-Gasteiz.</i>	19
<i>Figura 6. Válvula de Compuerta. Fuente: [28].</i>	21
<i>Figura 7. Líneas piezométricas de la RDA de Vitoria-Gasteiz.</i>	25
<i>Figura 8. Esquema malla cerrada.</i>	28
<i>Figura 9. Infraestructura AMVISA. Fuente: [30].</i>	30
<i>Figura 10. Red de abastecimiento de Vitoria-Gasteiz año 2010.</i>	32
<i>Figura 11. Simbología de elementos en QGIS.</i>	32
<i>Figura 12. Patrón de demanda diario.</i>	35
<i>Figura 13. Patrón de demanda de riego.</i>	35
<i>Figura 14. Patrón de demanda del depósito de Gardelegi.</i>	36
<i>Figura 15. Variación de altura del depósito de Araka.</i>	38
<i>Figura 16. Variación de altura total de los depósitos de Araka.</i>	38
<i>Figura 17. Patrón de equivalencia embalse del gorbea.</i>	39
<i>Figura 18. Trazado red 2024.</i>	41
<i>Figura 19. Tramos de red renovados desde 2010.</i>	42
<i>Figura 20. Patrón de consumo zona Albina.</i>	45
<i>Figura 21. Patrón de demanda del depósito de Gardelegi.</i>	45
<i>Figura 22. Patrón de consumo depósito S-19.</i>	46
<i>Figura 23. Variación del aporte y demanda de caudales a lo largo del día.</i>	51
<i>Figura 24. Presiones en los nodos RDA de Vitoria-Gasteiz 2024.</i>	53
<i>Figura 25. Pérdidas de carga máximas.</i>	55
<i>Figura 26. Pérdidas de carga unitaria más elevadas actuales.</i>	56
<i>Figura 27. Presiones en la zona de abastecimiento añadida.</i>	61
<i>Figura 28. Análisis de estrés de la RDA de Vitoria-Gasteiz.</i>	62
<i>Figura 29. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: [42].</i>	64
<i>Figura 30. Diagrama de Gantt.</i>	66
<i>Figura 31. Anexo I. Datos de entrada Nodos.</i>	76
<i>Figura 32. Anexo I. Datos de entrada Tuberías.</i>	76
<i>Figura 33. Anexo I. Datos de entrada Válvulas.</i>	77
<i>Figura 34. Anexo I. Datos de entrada Reservorios.</i>	77
<i>Figura 35. Anexo II. Caudales en la RDA de Vitoria-Gasteiz.</i>	78
<i>Figura 36. Anexo III. Barrios de Vitoria-Gasteiz. Fuente: [45].</i>	79
<i>Figura 37. Anexo IV. RDA zona Goikolarra, Arechavaleta y Gardelegi.</i>	80
<i>Figura 38. Anexo V. Demandas barrio de Salburua 2010.</i>	81
<i>Figura 39. Anexo V. Demandas barrio de Salburua 2024.</i>	82
<i>Figura 40. Anexo VI. Presiones zona sur 2024.</i>	83
<i>Figura 41. Anexo VI. Presiones en los nodos RDA de Vitoria-Gasteiz 2010.</i>	84
<i>Figura 42. Anexo VI. Pérdidas de carga superiores actuales.</i>	85
<i>Figura 43. Anexo VI. Pérdidas de carga superiores en 2010.</i>	86

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Coeficientes de rugosidad.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2. Elementos en la red.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Tuberías Existentes.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Resumen de nodos.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5. Resumen de demandas.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 6. Resumen nuevo trazado.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7. Coeficiente aplicado a nodos.</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8. Demanda de puebelos añadida al modelo.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 9. Demanda de Salburua.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 10. Resumen de demanda.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11. Demanda de pueblos añadida al MD.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 12. Presupuesto del TFG.</i>	<i>67</i>

Tabla de Acrónimos

Abreviatura	Significado
AI - IA	Artificial Intelligence – Inteligencia Artificial
AMVISA	Aguas Municipales de Vitoria-Gasteiz, Sociedad Anónima
DT - GD	Digital Twin – Gemelo Digital
ETAP	Estación de Tratamiento de Agua Potable
FC	Fibro cemento
FD	Fundición Dúctil
FG	Fundición Gris
GIS	Geographic Information System
HCC	Hormigón Camisa de Chapa
ICT - TIC	Information and Communication Technologies – Tecnologías de la Información y Comunicación
MD	Modelo Digital
MDP	Maximum Design Pressure - Máxima Presión de Diseño
PE	Polietileno
PMA	Presión Máxima Admisible
QDZ	Curva de Demanda Zonal
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SWG - RAI	Smart Water Grids – Redes de Agua Inteligentes
SWM	Smart Water Management – Gestión Inteligente del Agua
UPV/EHU	Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
WDN - RDA	Water Distribution Network - Red de Distribución de Agua

1 Introducción

El agua potable es un bien primario que todo el mundo necesita, y el abastecimiento de esta agua lleva siendo una actividad que todas las ciudades han tenido que efectuar desde hace muchos siglos. Las primeras civilizaciones usaban canales, tanto abiertos como cerrados, a presión atmosférica para transportar el agua, como los acueductos romanos. Siglos más tarde, gracias a la revolución industrial, las ciudades empezaron a instalar tuberías de fundición que transportarían el agua a presión mayor a la atmosférica tal y como lo conocemos. Hoy en día, las ciudades cuentan con redes de abastecimiento subterráneas que distribuyen el agua desde las captaciones hasta los habitantes.

Las nuevas tecnologías y la transición digital permiten tener un control de esta gestión de una manera mucho más eficaz a la que se ha venido realizando hasta ahora. A pesar de que los avances tecnológicos se asocian más a actividades más científicas o industriales, hay quienes aprovechan estos avances para implantarlos en un sector o actividad tan antiguo como la distribución de agua. Gracias a la digitalización, las entidades que controlan las redes de distribución de agua (RDA) pueden tener una información mucho más precisa de lo que ocurre metros más debajo del suelo de las ciudades, además de poder prever el comportamiento de la red y guardar un registro de usos e incidencias.

El modelo digital (MD) es una herramienta que permite simular lo que sucede en las tuberías de suministro de agua potable desde un simple ordenador permitiendo simular el comportamiento de la red y tomar decisiones en base a los resultados obtenidos. Este TFG trata el MD que simula la red de abastecimiento física de la ciudad de Vitoria-Gasteiz.

1.1 Contexto

Vitoria-Gasteiz es una ciudad situada al norte del estado español, concretamente en la comunidad autónoma vasca, siendo capital de ésta. Geográficamente hablando se encuentra en el centro de la provincia de Álava. La ciudad cuenta con una población de alrededor de 250.000 habitantes y una importante red industrial. Aguas Municipales de Vitoria-Gasteiz, S.A. (AMVISA), es la empresa encargada de la prestación del servicio público del ciclo integral de las aguas en esta ciudad. También presta este servicio a entidades menores de población de este municipio y de los municipios limítrofes de Arrozua-Ubarrundia, Legutiano y Zigoitia. Se trata de una empresa privada municipal, ya que el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz consta como único accionista [1].

El ciclo integral de las aguas que ofrece la empresa está integrado principalmente por dos bloques. El primer bloque se trata del abastecimiento, que está compuesto por cuatro competencias: captación, almacenamiento, potabilización y distribución de agua potable. El TFG se va a centrar mayoritariamente en esta última competencia. El segundo bloque trata el saneamiento, que comprende la recogida y transporte a través del alcantarillado, depuración y reutilización de las aguas residuales, así como el tratamiento de lodos y residuos producidos [1].

Actualmente AMVISA se encuentra en un proceso de transformación digital del ciclo integral del agua, denominado SMART 2025. De cara a conseguir los numerosos objetivos y metas que este proyecto plantea, AMVISA ha recibido por parte de la Unión Europea (UE) una importante cantidad de dinero que se eleva hasta los casi ocho millones de euros [2]. En esta situación, la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y AMVISA han iniciado una cooperación que será beneficiosa para ambas entidades estructurada mediante el Aula del Agua AMVISA, y así poder lograr los avances tecnológicos que se necesitan [3].

La realización de este TFG es concretamente una colaboración entre AMVISA y la UPV/EHU. Se realiza sobre un marco de prácticas de cinco meses de duración y 750 horas. Para llevar a cabo el proyecto, se brinda un espacio equipado con todo el material necesario llamado Aula del Agua, ubicado en la universidad. Además, el alumno recibe una ayuda económica por la realización del trabajo.

1.2 Objetivos y alcance

A continuación, se enumeran los principales objetivos del TFG. La finalización del primer objetivo es indispensable para la realización de los siguientes. El alcance del trabajo intentará ser el descrito en los objetivos.

- El primer objetivo principal es la actualización del MD de la red de distribución de agua (RDA) potable de la ciudad de Vitoria-Gasteiz. Para ello, se cuenta con un modelo desactualizado de la red, el cual se modeló hace aproximadamente 14 años. Desde entonces, este modelo ha quedado en el olvido y no ha recibido ninguna actualización. Por lo tanto, el modelo requiere de una actualización completa de todos los cambios que le afectan.
- El segundo objetivo es comparar la red actual con la red de 2010. Para ello se determinará cuáles son los principales cambios que han ocurrido y como afectan al funcionamiento de la red.
- Como tercer objetivo se encuentra el análisis detallado de la red actual una vez esté totalmente renovada. Con este TFG se pretende analizar parámetros de la red de una manera más detallada que en la comparación. El principal subobjetivo es encontrar los puntos débiles de la red, y ofrecer posibles soluciones.
- El cuarto objetivo, es tratar de calibrar el modelo con datos reales obtenidos en diferentes puntos de medición de la red. De esta manera, se podrá corregir aquellos puntos erróneos y se podrá validar el modelo. Así una vez el modelo sea validado, se podrá utilizar para futuros proyectos de análisis dentro de AMVISA.
- Como ultimo objetivo, el cual es muy ambicioso, es iniciar la incorporación de datos obtenidos en tiempo real con aparatos de medición telemáticos dentro del MD. Se trata de incorporar estos datos para comparar en tiempo real los resultados de la simulación con los de la red física. Por último, si es posible, se intentará que algunos de estos datos pasen a

formar parte de las variables del MD, empezando de esta manera la creación de un gemelo digital (GD) de la RDA de Vitoria-Gasteiz.

1.3 Estructura del TFG

El trabajo está dividido en 8 apartados principales.

El primer apartado es la introducción, el cual incluye el subapartado en el que actualmente se encuentra. Esta sirve a modo de presentación y brinda un contexto general sobre la realización del TFG y AMVISA. También trata de exponer los objetivos principales de este TFG, así como su estructuración.

El segundo apartado tiene como objetivo informar y poner en conocimiento al lector de una manera técnica sobre los términos requeridos para entender los temas a tratar. Primero se empieza por la definición de GD y su aplicación en redes de distribución. En el segundo subapartado se explican los softwares utilizados en la actualización del MD. En el subapartado siguiente se define lo que viene a ser una red de abastecimiento, y la composición de cada uno de sus elementos fundamentales. En el cuarto subapartado se hace una explicación de los conceptos básicos y las leyes fluido-mecánicas que regulan los fluidos en una red. Por último, este apartado se finaliza con la presentación de la infraestructura de AMVISA.

El tercer apartado sirve para presentar y llegar a comprender la situación de la red inicial de Vitoria-Gasteiz y el estado del MD. En este apartado se explican los elementos y variables que dan forma al MD, así como sus características.

En el cuarto apartado se explica el proceso de la actualización de la red de Vitoria-Gasteiz. En este apartado se presenta la actualización del trazado y un resumen de la situación actual. Se explicará también cómo se han actualizado los patrones de demanda, así como la demanda total de consumo de agua del modelo.

El quinto apartado, tiene dos propósitos. En él, se compara el MD actual con el MD antiguo en los aspectos más críticos. A su vez se realiza un análisis general y detallado de la RDA actual. En esta sección se analizan y se comparan los parámetros más importantes de una red, como son la presión de los nodos, las pérdidas de carga y las velocidades.

El sexto apartado presenta dos casos prácticos realizados sobre la RDA. El primero de ellos es la incorporación de la red externa de Mandojana al MD y su análisis de viabilidad. El segundo es un análisis de estrés de la red, donde se trata de encontrar el punto de fallo y determinar cuanta demanda podría soportar la infraestructura de Vitoria-Gasteiz.

El séptimo apartado incluye una mención a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y como el TFG se alinea con estos. También se presenta un diagrama de Gantt en el que se explica en una línea temporal como se ha llevado a cabo el proyecto. Por último, se estima el presupuesto de la realización del TFG.

Para finalizar el trabajo, y como octavo y último apartado, se presentarán las conclusiones y se hará una consideración de futuras líneas de análisis y mejora a seguir en los próximos años dentro de la RDA gestionada por AMVISA.

2 Marco teórico

Este apartado está dividido en varios bloques, que juntos tratan de poner en conocimiento al lector sobre los temas a tratar en este TFG. En el primer bloque se explica el concepto de GD y como se aplica a las redes de abastecimiento de agua, nombrando varios ejemplos actuales. Seguido, se presentan los softwares utilizados en la realización de este TFG. El tercer apartado define las características de la RDA de Vitoria-Gasteiz y cuáles son los elementos que lo componen. En el cuarto apartado se brinda un resumen de los conceptos básicos hidráulicos y las ecuaciones que regulan el comportamiento de un fluido a presión en tuberías. Por último, se describe detalladamente la infraestructura que maneja AMVISA en territorio alavés.

2.1 Gemelo digital (GD)

Para comprender que es un GD, primero hay que saber que actualmente vivimos en la cuarta revolución industrial, también llamada como industria 4.0. Esta revolución se caracteriza por el uso de tecnologías electrónicas e informáticas, para la automatización y digitalización de los procesos, del mismo modo que por las capacidades de interacción y el intercambio de información entre humanos y máquinas [4]. La tecnología digital permite que el mundo físico y el digital se fusionen, gracias a la interconexión de los dispositivos con sensores y el software que trabajan en red. Esto permite que la información esté disponible en tiempo real para cualquier usuario [4].

Una de las tecnologías emergentes que da acceso poder llevar a cabo esta digitalización es el gemelo digital (GD), o “digital twin” (DT) llamado en inglés. Este se define como la réplica virtual, a imagen y semejanza de un producto, servicio, proceso o sistema tangible, obteniendo datos e información en tiempo real, fusionando el mundo real y virtual [5]. La implementación virtual de un GD facilita la evaluación y seguimiento del funcionamiento, estados y características de los elementos físicos. Básicamente, supervisa el ciclo de vida de un proceso al imitar su funcionamiento en un modelo [6].

Y es que gracias al avance de las nuevas tecnologías como el Internet of Things (IoT), Big Data, Cloud Computing entre otras, las cuales permiten gestionar información de forma eficaz e inteligente, han facilitado la expansión de los GDs a numerosos sectores y organizaciones. Hoy en día se estima que más de un 50 % de las empresas industriales hace uso de esta tecnología [5].

Los GDs se basan en cuatro principales fundamentos teóricos, que proceden de diferentes disciplinas como la ingeniería de producción, la ciencia de datos o la ciencia de la información. Estos fundamentos son el modelado y simulación, la fusión de datos, la interacción y colaboración, y el servicio [7].

En la base de la aplicación práctica de los GDs encontramos el modelado y la simulación, es decir el MD. Para construir el MD se debe obtener toda la información sobre la geometría y las

características de los materiales que se emplean. En la modelación también se debe introducir el comportamiento físico, el funcionamiento, la interacción y la simulación, es decir, cómo se comporta el objeto físico. Esto se realiza con la ayuda de complejos softwares con algoritmos de cálculo incorporados. Para finalizar, el modelo debe evaluarse con precisión para garantizar la semejanza entre las realidades físicas y virtuales [7].

La fusión de datos es esencial, ya que los GDs deben manejar enormes cantidades de información recolectada de diversas fuentes, como dispositivos, bases de datos o entornos virtuales. La interacción y colaboración es fundamental para que todos los componentes del GD resuelvan problemas sin errores. Gracias a las interacciones, los GDs se pueden emplear para que un sistema de producción se adapte de manera constante en tiempo real a los cambios en su entorno físico. Asimismo, las unidades físicas podrían seguir las órdenes basadas en los resultados de una simulación previa en un MD. El último fundamento teórico del GD es el servicio y la gestión. Este brinda ayuda para reforzar diferentes aspectos como la supervisión, la previsión de vida útil, el mantenimiento en el tiempo, la evaluación de la calidad o la detección de fallos [7].

Este TFG se centra en el primer fundamento del GD, que trata lograr una modelización de la red de Vitoria-Gasteiz que simule el comportamiento físico de esta. El último objetivo se alinea también con el segundo fundamento del GD, que es la fusión de datos reales con el MD. Esta comprensión del GD es necesaria para saber dónde se encuentra situado el MD de la red.

2.1.1 Requerimientos de un GD de una RDA

Cuando aplicamos un GD a una red de abastecimiento, esta recibe el nombre de red de agua inteligente, que proviene del inglés Smart Water Grids (SWG). Esto consiste en integrar las nuevas tecnologías como el IOT o el Big Data dentro del manejo de una RDA. Una SWG trata de asegurar un suministro eficiente de agua teniendo en cuenta diversos factores, como el crecimiento de la población, que lleva consigo una intensificación de demanda de agua, o riesgos imprevistos futuros [8].

Las SWG permiten que el flujo del agua se controle automática y digitalmente a través de sensores y herramientas analíticas, facilitando el control general de la red. Las SWG dan pie a una Gestión Inteligente del Agua (Smart Water Management, SWM), que busca mejorar en todo momento la eficiencia de la red. Una buena SWM permite reducir pérdidas de agua y de presión, asegurar la calidad del agua, detectar previamente fugas de agua, todo para satisfacer a los consumidores. En definitiva, una SWM es primordial para mejorar la eficiencia del sistema en todos los sentidos [8].

Para la implementación del GD de una RDA o, lo que viene a ser parecido, una SWG, se necesitan las tecnologías que aparecen en la Figura 1.

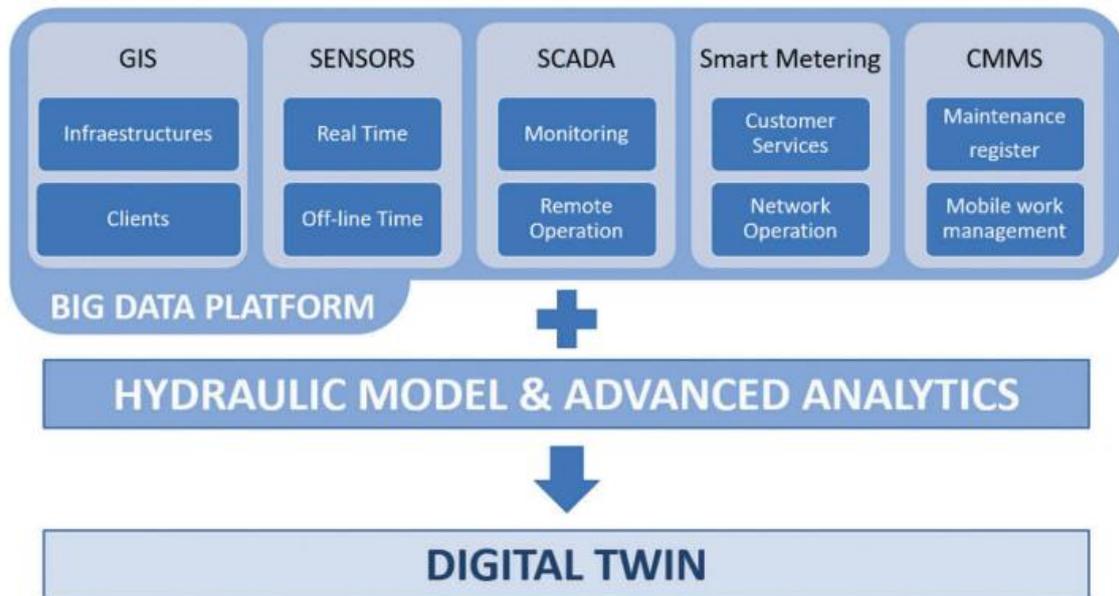


FIGURA 1. ESTRUCTURA DE UN GD DE UNA RDA. FUENTE: [9].

- GIS (Geographic Information System): Un software GIS permite la visualización espacial georreferenciada de los componentes que forman la red, mostrándolos sobre mapas para una comprensión y gestión más sencilla. Las ventajas de un GIS también residen en la presentación de la información, así como sus habilidades para listar, ordenar, guardar, manipular o analizar los datos [8].
- Sensores: Para monitorizar las presiones en la red y controlar las pérdidas de agua, los sensores inalámbricos son esenciales. Estos sensores no requieren casi energía para su funcionamiento por lo que no implican grandes costes. Permiten tomar medidas reales sin necesidad de que ningún trabajador se tenga que desplazar a el lugar [8].
- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition): Un sistema SCADA es una herramienta que permite la supervisión y adquisición de datos en tiempo real. En este caso del proceso de distribución de agua. A través de la conexión de servidores y ordenadores entre sí por medio de una red, permite monitorear y controlar de manera centralizada estos dispositivos. El SCADA ofrece una interfaz que ayuda en la toma de decisiones en tiempo real [10].
- Medición Inteligente: Esta es una herramienta que recoge datos en tiempo real del agua consumido. Las mediciones precisas permiten establecer patrones reales de demanda, ayudando en la toma de decisiones. Con estos datos se pueden fijar mejores precios de consumo de agua, así como estrategias para la conservación del agua. También permite mejorar el equilibrio entre la satisfacción de la demanda y la eficiencia de la red [8].
- CMMS (Computerized Maintenance Management Systems): Este sistema trataría de llevar un registro de los mantenimientos realizados y los futuros, para tratar de minimizar roturas y fallas en la distribución de agua. Asimismo, mientras un sector de la red está siendo

renovado, aislaría automáticamente este de la red de manera que simule un correcto flujo del agua [9].

Por último, se necesita un modelo hidráulico, una buena base del GD, un software que proporcione resultados coherentes y precisos a las simulaciones. El software debe estar continuamente alimentado de datos físicos reales obtenidos con los sistemas anteriores. Al integrar el modelo hidráulico a todas las fuentes de información mencionadas, y con ayuda de análisis avanzados y algoritmos de Inteligencia Artificial, se consigue un GD que emula a la perfección la RDA [9].

Con este trabajo no se va a llegar a tal punto de complejidad, pero se plantea como un primer paso para llegar a este sistema. La idea principal es actualizar el modelo hidráulico inicial en un entorno GIS, de modo que se introduce la primera tecnología al modelo. A ello le faltarían por añadir los otros 4 elementos para pasar de ser meramente un MD a un GD.

2.1.2 Uso de gemelos digitales ejemplos

Hoy en día la implantación de los SWG se está extendiendo en muchas ciudades del mundo, consiguiendo de esta forma una SWM. El objetivo de estas ciudades es la de tener un control total sobre el consumo de agua en tiempo real, y minimizar todos los problemas que las redes pueden acarrear, como la escasez de suministro, degradación de la calidad del agua, aumento de consumos energético o el envejecimiento de la infraestructura, entre otros. Actualmente, Singapur, Australia, la Unión Europea (UE), los Estados Unidos (EE. UU.) y Corea del Sur son los países o zonas más avanzadas en esta gestión inteligente [11].

Una ciudad-estado que tiene implementado un sistema de monitoreo real de la gestión hídrica es Singapur. Debido a la escasez de agua que tiene el país, ya que importa un 40% del agua de su país colindante Malasia, se desarrolló un sistema llamado WaterWiSe para asegurar un abastecimiento estable. Este sistema permite a la empresa nacional de la gestión del agua (PUB) controlar en tiempo real parámetros como la calidad del agua, así como el pH, su conductividad, la turbidez y la presión. Desde 2013 lleva en pleno funcionamiento el sistema que permite a Singapur llevar a cabo una SWM que es referente a nivel mundial [11].

En California, Estados Unidos, más concretamente en la bahía de San Francisco, han implementado un SCADA que les permite automáticamente operar en plantas y redes, así como controlar alarmas en tiempo real. Con esta implementación han conseguido reducir el uso de energía en un 30% y reducir la pérdida de agua en un 20% [12]. El gobierno de San Francisco hizo una promoción de descuentos en las facturas a los consumidores con el fin de que los consumidores instasen medidores de caudal en sus propiedades [13]. El acceso a los datos de consumo en tiempo real permitió detectar problemas de calidad y localizar picos de pérdidas de agua y tras solucionarlo se consiguió reducir tanto las pérdidas como el consumo energético [12].

En España, Valencia es reconocida internacionalmente por su gestión de la RDA de la propia ciudad y su área metropolitana. Las empresas Global Omnium y GoAigua, con la ayuda de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) desarrollaron un GD que actualmente siguen manteniendo. Primero se desarrolló un software llamado GO2HydNet para obtener un modelo detallado la red en un ambiente GIS, y después fue conectado a toda la fuente de datos que se disponía para crear el GD. Esto les permite poder simular el MD con datos en tiempo real, así como del pasado, para poder predecir condiciones futuras [9]. Como dato, en la creación de GO2HydNet participó muy activamente Fernando Martínez Almazora, director actual del proyecto QGISRed [14].

2.2 Softwares y herramientas utilizadas en el modelo

En la creación en 2010 del MD de la RDA de Vitoria-Gasteiz se utilizó exclusivamente el software EPANET. Durante este periodo de tiempo, con ayuda de los avances en los softwares de tipo GIS, ha surgido una nueva herramienta para poder diseñar RDAs de manera georreferenciada, diseñada dentro del software QGIS. Esta herramienta se trata de QGISRed, y es capaz de abrir archivos de EPANET y georreferenciar los elementos automáticamente. Es por ello por lo que QGISRed ha sido la utilizada para actualizar el inicial modelo de 2010.

2.2.1 QGIS

QGIS (Quantum Geographyc Information System, ver Figura 2), como su propio nombre en inglés dice, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) gratuito y de disponibilidad libre. Los GIS, son herramientas informáticas para trabajar con datos georreferenciados. Este software funciona como una base de datos de información geográfica, que se encarga de recopilar, almacenar y analizar los datos geolocalizados. A través del sistema, estos datos permiten ser representados gráficamente en forma de mapas [15].



FIGURA 2. LOGO QGIS. FUENTE: [16].

QGIS nace en 2002 impulsado por voluntarios y tiene como finalidad ser un SIG sencillo que llegue al alcance de cualquier persona con acceso a un ordenador. A diferencia de otros sistemas GIS de pago como ArcGIS, QGIS permite la libre modificación, ya que se encuentra licenciado bajo GNU General Public License (GNU GPL). Es decir, cualquier usuario puede inspeccionar y modificar su código fuente para desarrollar la actividad que desee. De esta manera, la comunidad contribuye a la corrección de errores y da soporte a otros usuarios. En resumen, QGIS es lo que se conoce como una aplicación profesional de SIG construida sobre Software Libre y Código Abierto [16].

En cuanto a QGIS, actualmente, ofrece herramientas de análisis vectorial, análisis ráster, muestreo, geoprocésamiento, geometría y gestión de bases de datos. Además, cuenta con una gran variedad de complementos disponibles, creados por desarrolladores independientes que hacen que este software sea referencia a nivel mundial entre los programas SIG de escritorio. Algunos de estos Plugins, dada su utilidad, han pasado a ser parte de QGIS. QGISred es un Plugin más, que se creó para construir redes de agua digitales [17].

2.2.2 EPANET

Una red de distribución de agua tiene como finalidad suministrar agua en unas condiciones en cuanto a presión, cantidad y calidad adecuadas a aquellos puntos de consumo. Para gestionar una red de manera óptima, se requiere de un MD donde se representen y estudien estos parámetros. Tras esta idea, Lewis Rossman alrededor de los años 90 desarrollo el software EPANET (ver Figura 3). Su idea fue crear una aplicación informática sencilla de usar para modelizar el comportamiento hidráulico y de calidad del agua potable en sistemas de distribución [18].

Hoy en día, EPANET es un software gratuito y de código abierto que nos permite simular el comportamiento hidráulico en una red de abastecimiento de agua a presión por un tiempo prolongado. También da la opción a estudiar la evolución de la calidad del agua midiendo las concentraciones de elementos químicos presentes en el agua. En cuanto a los elementos de una red, esta debe estar constituida solo por los siguientes elementos: tuberías, nudos, bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento. Tras la simulación obtendremos resultados como los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos o los niveles en los depósitos [19].

Como resumen, este programa ofrece un motor donde introduciendo datos de entrada y simulando la red, podremos visualizar los resultados en modo de tablas, gráficos o mapas simples. EPANET es el software que incluye los algoritmos para el cálculo de los parámetros de una red.



FIGURA 3. LOGO EPANET. FUENTE: [18].

2.2.3 QGISRed

QGISRed es un plugin o complemento de QGIS de uso libre que sirve para construir y analizar modelos hidráulicos de redes de distribución de agua. Este complemento es en su conjunto una plataforma de trabajo, no una herramienta para facilitar tareas. Es decir, QGISRed utiliza las capacidades de EPANET conectándose a este software para el cálculo hidráulico y amplía sus

opciones de edición gracias al entorno GIS. QGISRed aprovecha todas las ventajas de un GIS en cuanto a georreferenciación de elementos de la red, visualización de imágenes por capas, personalización de simbologías y demás, que EPANET no ofrece. En la Figura 4 podemos ver una imagen que resume a la perfección QGISRed [14].



FIGURA 4. EXPLICACIÓN DE QGISRED.

Por otra parte, QGISRed permite darle mayor precisión a el modelo y conectarlo a una base de datos reales. Estos datos pueden obtenerse a través de la telelectura de las acometidas o a través de sensores que comparen las medidas reales de campo con los valores simulados. También se pueden conectar válvulas manuales que permitan sectorizar la red de modo temporal para realizar operaciones de mantenimiento. QGISRed no solo da la opción de crear un MD en un entorno GIS, sino que también permite ampliarlo a un GD con la incorporación de datos reales [14].

QGISRed nació en 2019, siendo la sucesora de la antigua herramienta GISRed, desarrollada por Fernando Martínez, director actual del proyecto QGISRed. Tras la creación de uno de los primeros GDs para la ciudad de Valencia, se decidió incorporar la herramienta llamada Gemelo Digital en QGISRed. Esto ayudará a empresas gestoras de servicios de abastecimiento de agua como puede ser AMVISA en la toma de decisiones. Hay que destacar que QGISRed está en constante desarrollo, ampliando sus prestaciones a las necesidades que van surgiendo [14].

2.2.4 Diseño en QGISRed: elementos y datos de entrada

A la hora de introducir elementos en el diseño de la RDA de Vitoria-Gasteiz en QGISRed, son necesarios una serie de datos para que el modelo funcione. Cada elemento o componente requiere de un tipo de dato diferente. Los datos que introducimos en QGISRed son como mínimo los mismos que se introducen en el motor de cálculo EPANET, ya que al realizar la simulación QGISRed se conecta con el software EPANET. Todos los datos que se pueden introducir en los elementos modelados se encuentran en el Anexo I. En la siguiente lista se nombran solo los parámetros que se han incorporado en el MD [19]:

- **Nodos:** Puntos de la red donde se juntan las tuberías y donde el agua puede entrar o salir de la red.
 - **Datos de entrada:** Cota sobre el nivel del mar (m), demanda de agua (l/s) y patrón de demanda. Ver Figura 31. Anexo I.
- **Tuberías:** Líneas completamente llenas de agua que llevan agua desde un extremo con mayor altura piezométrica a otro extremo con menor altura.

- Datos de entrada: nodos de entrada y de salida, diámetro (mm), coeficiente de rugosidad (mm), longitud (asignada geográficamente) y estado (abierta). Ver Figura 32. Anexo I.
- Válvulas: Líneas que limitan la presión o el caudal en puntos específicos de la red.
 - Datos de entrada: nudos de entrada y de salida, diámetro (mm), tipo (TCV), estado (abierta) y coeficiente de pérdida de carga. Ver Figura 33. Anexo I.
- Reservorios: Nodos que representan una fuente infinita externa de agua hacia la RDA.
 - Datos de entrada: cota sobre el nivel del mar (m) y patrón de altura variable en el tiempo. Ver Figura 34. Anexo I.
- Patrones de tiempo: Colección de coeficientes multiplicadores aplicadas a un valor que permiten que este varíe en el tiempo, como la demanda en nodos y la altura en reservorios.
 - Datos de entrada: intervalo horario (1 h) y coeficientes multiplicadores.

Además, todos los elementos tienen un número o nombre identificativo (ID) y unas coordenadas, que hacen que cada elemento se pueda diferenciar y geolocalizar.

2.3 Red de distribución de agua

Una red de abastecimiento de agua tiene como finalidad hacer llegar agua potable desde una fuente hasta unos usuarios de consumo en unas condiciones óptimas tanto de cantidad como de calidad. Esta red o sistema de abastecimiento se compone de varios procesos. El primero de ellos es la captación de agua de una fuente que mayoritariamente suele ser natural, como ríos o pantanos. Seguido viene la conducción de esta agua bruta hasta la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), donde se aplican procesos físicos, químicos y mecánicos para dotar al agua de unas condiciones seguras para el consumo humano. En las ETAP, por lo general, también se ubican los depósitos reservorios donde se almacena el agua potable para su posterior distribución [20].

El último paso es la distribución del agua potable desde los tanques de almacenamiento hasta los puntos de consumo, donde los usuarios hacen uso de esa agua. Esto se hace a través de la red de distribución, que compuesta principalmente por tuberías y válvulas debe mantener la calidad, cantidad y presiones necesarias [21]. A este último paso, también se le considera como abastecimiento en baja, y se lleva a cabo gracias a la fuerza de la gravedad.

En la Figura 5 se puede ver un esquema simplificado que se asemeja a la red de abastecimiento de Vitoria-Gasteiz, que más tarde se explicará detalladamente. Por lo tanto, la red de abastecimiento sería el sistema completo, desde la captación hasta el consumo de agua. Mientras, la red de distribución solo comprendería el transporte de agua desde los depósitos hasta los usuarios de consumo.

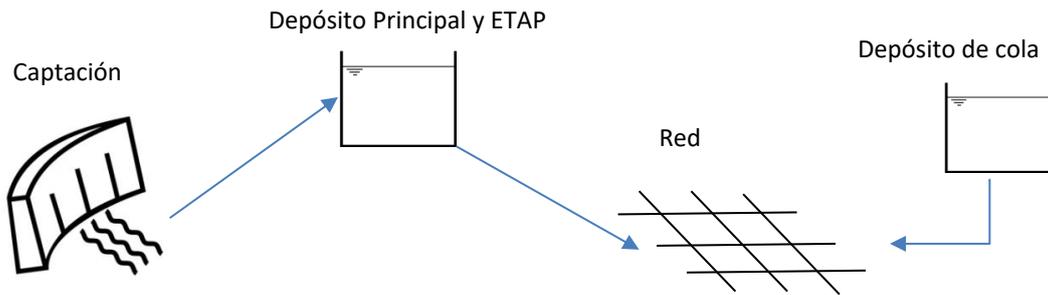


FIGURA 5. ESQUEMA RED DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE VITORIA-GASTEIZ.

2.3.1 Tipo de red

La red de distribución de Vitoria-Gasteiz se considera una red completamente cerrada y mallada. Esto quiere decir que las tuberías están comunicadas todas entre sí, permitiendo que el agua pueda circular en los dos sentidos. Esto brinda una buena repartición de la presión y seguridad en el suministro, ya que la red se puede dividir en sectores. En caso de avería o corte de suministro, bastará con cerrar las válvulas necesarias para dejar fuera de servicio la zona afectada, y el agua podrá llegar al punto de consumo por otras tuberías [22].

Por otro lado, se puede clasificar a la red de distribución como un sistema de anillo o circular. La característica de estos sistemas es que las tuberías principales forman un anillo alrededor de la zona de distribución, de la que salen ramales hacia adentro. Este sistema es ideal para ciudades bien planificadas como Vitoria-Gasteiz, que cuenta con un anillo principal y ramales que salen tanto hacia fuera como hacia adentro de él.

A este anillo, junto con la tubería de alimentación que lleva el agua desde los depósitos hasta el propio anillo, se le considera la red primaria, ya que comprende las tuberías de mayor diámetro y con mayor caudal. El resto de la red se le considera red secundaria, ya que comprende las tuberías de menor diámetro que abarcan toda la ciudad. En la Figura 35. Anexo II se observa claramente las tuberías de alimentación que llegan desde los depósitos tanto principales como en cola y el anillo circular, que juntos forman la red primaria.

2.3.2 Elementos de una red de abastecimiento

Una RDA se compone de numerosos elementos de los cuales algunos como las tuberías o las válvulas son esenciales. Otros, como las bombas, no siempre aparecen en las RDA. En este apartado únicamente se detallan los elementos introducidos en el MD.

2.3.2.1 Tuberías

El sistema de tuberías está formado por un conjunto de tubos con secciones circulares unidos entre sí. La unión de tuberías se hace mediante sistemas de unión que se denominan nodos. Estos tubos son los encargados de transportar el agua por su interior y tienen diferentes características dependiendo del material y del diámetro nominal de los mismos. La elección del material es primordial a la hora de diseñar una red, y hay que tener en cuenta parámetros como

la resistencia mecánica, la durabilidad, la resistencia a la corrosión o la conservación de la calidad del agua entre otros.

Los materiales utilizados dentro de la RDA de Vitoria-Gasteiz son los siguientes:

- **Fundición Gris (FG):** Las tuberías de hierro de FG son uno de los materiales más antiguos empleados en las redes de agua, que desde el siglo XVIII hasta hoy en día ha sido utilizado. Este material se caracteriza por ofrecer una durabilidad muy alta, que supera incluso los 100 años de servicio manteniendo sus propiedades. En las situaciones donde se requiere rigidez, resistencia al impacto y a la corrosión, el hierro fundido es una buena opción [23].
- **Fundición Dúctil (FD):** La tubería de hierro de FD apareció en los años 50 como una mejora de la FG, ya que, tras un proceso estructural interno, el hierro pasa a obtener un comportamiento más resistente y flexible. Las tuberías de FD tienen varias ventajas como una vida útil que llega a los 100 años, una alta resistencia mecánica tanto a cargas externas como internas y una alta resistencia a la corrosión. Además, su necesidad de mantenimiento es prácticamente nula. Es por ello por lo que las tuberías de FD han sustituido en su totalidad a las de FG, las cuales ya no se fabrican [23].
- **Fibro cemento (FC):** Esta tubería está formada principalmente por dos materiales, el amianto, mediante fibras, y el cemento, de ahí su nombre. Estas tuberías han sido muy utilizadas en la segunda mitad del siglo XX para transportar agua potable. Sin embargo, en el año 2003 se prohibió toda comercialización del amianto a causa de sus efectos dañinos en la salud de las personas. Hoy en día, las tuberías de fibrocemento siguen siendo parte de las redes de distribución de muchas ciudades, como es el caso de Vitoria-Gasteiz, aunque la intención es retirarlo completamente de la red. Este material es ligero y no se corroe, pero no resiste bien a los cambios bruscos de presión lo que conlleva a un índice alto de roturas comparándolo con otros materiales [24].
- **Polietileno (PE):** El polietileno es un material termoplástico que gracias a su flexibilidad y resistencia también se usa en las RDA. Más concretamente la clase de PE que se emplea es el de alta densidad (HDPE), ya que resiste mayores presiones. Entre las ventajas que tienen estos tubos destacamos su bajo coste, su comodidad para el manejo e instalación y el aislamiento térmico que ofrece. Además, tienen una alta capacidad de conducción, minimizando las pérdidas de carga, siendo a la vez inmunes a la corrosión. Los diámetros en los que se emplea estas tuberías suelen ser menores en comparación con otro tipo de tuberías. Esta tubería entra dentro de la clase de tuberías de plástico, donde encontramos también las tuberías de policloruro de vinilo (PVC) [25].
- **Hormigón Camisa de Chapa (HCC):** La tubería HCC está compuesta por una lámina de acero interior, de ahí el nombre “Camisa de Chapa”, recubierta tanto externamente como internamente por hormigón. Estos tubos también reciben el nombre de tuberías de concreto. Este material se utiliza para las tuberías de mayor diámetro que se instalan en las

redes principales, generalmente mayores de 500 mm y hasta los 3000 mm. Destacan por su alta resistencia mecánica, su larga vida útil y su bajo mantenimiento [26].

- Resto: A parte de los materiales mencionados, existen otros materiales que habitualmente se usan en una RDA, como son por ejemplo las tuberías de acero (galvanizado, inoxidable, al carbono, etc.) o el ya mencionado PVC. En la RDA de Vitoria-Gasteiz apenas encontramos tuberías de estos materiales, por lo tanto, no vamos a comentar sus características.

A todas las tuberías, se les aplica un coeficiente de rugosidad dependiendo de la capacidad de conducción de agua que tengan. Este coeficiente de rugosidad afecta a la pérdida de carga que sufre la red. Es decir, a mayor coeficiente de rugosidad, mayor pérdida de carga encontraremos en la tubería y menor será la capacidad de conducción. Mas adelante se mostrarán las ecuaciones de pérdidas de carga.

2.3.2.2 Válvulas

Las válvulas son un elemento esencial en el funcionamiento correcto de una RDA, abarcando numerosas funciones. La principal función de una válvula es la del control del flujo. Con ello se controla la presión, se regulan los niveles en los depósitos y se aíslan sectores de la red. Algunas válvulas permiten liberar aire, prevenir el vacío en el interior de las tuberías, así como el reflujos allá donde se necesite [27].

Existen numerosos tipos de válvulas usadas en las RDA, entre los que nos encontramos las válvulas de compuerta, de mariposa, de bola o de retención entre otras. Las más comunes son las válvulas de compuerta, y como su propio nombre indica, contienen una compuerta que permite o bloquea el flujo del agua. Estas válvulas no ofrecen apenas resistencia cuando están completamente abiertas, por lo que son ideales para no generar pérdidas de carga elevadas ni golpes de ariete. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de este tipo de válvulas.

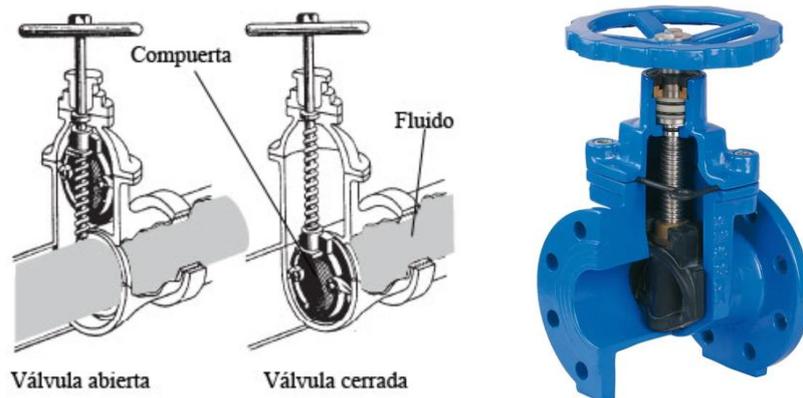


FIGURA 6. VÁLVULA DE COMPUERTA. FUENTE: [28].

2.3.2.3 Depósitos o tanques

Los depósitos o tanques se utilizan para garantizar unas condiciones al agua en cuanto a presión y cantidad. Estos tanques regulan el abastecimiento a la red y la alimentan a través de la línea

de conducción. Los tanques como los de Araka, tienen la función de almacenamiento, en cambio, los tanques como el de Gardelegi, tienen la función de regulación. Todos los depósitos de distribución tienen un nivel de volumen para regular y otro para almacenar. El primero viene dado entre los niveles máximos y mínimos que oscilan diariamente, y el segundo se mantiene constante para un supuesto fallo de suministro a los tanques. Al depósito en cola de Gardelegi se le considera un depósito flotante, ya que el agua puede tanto entrar como salir por la misma conexión dependiendo de la demanda de la red, y también cuenta con esos 2 niveles. Adicionalmente a estos niveles, se suele guardar otro porcentaje del volumen del tanque en caso de incendio, lo que conlleva un gasto repentino y muy elevado de agua [29].

2.3.2.4 Acometidas

Las acometidas o tomas domiciliarias conducen el agua desde la red secundaria hasta el cuadro domiciliario, donde se toman las lecturas de consumo de agua. En las memorias anuales de la RDA de Vitoria-Gasteiz se enumeran más de 10.000 acometidas. Es decir, hay más de diez mil puntos donde existe una demanda de agua potable, ya sea para domicilios, empresas o edificios públicos [30]. A estas acometidas también les llamaremos nodos de consumo.

2.3.2.5 Otros elementos

Como alguno se puede imaginar, existen otros tantos elementos que componen las RDA como son las bombas hidráulicas, desagües, pozos, bocas de riego, hidrantes contra incendios y demás. Sin embargo, en el modelo que explicaremos más adelante no se van a incluir ninguno de estos elementos, ya que a la hora de simular la RDA de Vitoria-Gasteiz no tienen demasiada importancia en el comportamiento hidráulico. Es por eso por lo que en este TFG no se va a profundizar en dichos elementos, ya que para su comprensión no es necesario.

2.4 Fundamentos mecánicos de redes hidráulicas a presión

En esta sección se van a explicar las ecuaciones básicas para la comprensión del funcionamiento de una red de distribución, así como conceptos básicos hidráulicos. Para ello se deben de hacer varias hipótesis sobre el fluido. En este caso, supondremos que el agua es un fluido ideal incompresible, con viscosidad nula e irrotacional [31].

2.4.1 Caudal

El caudal o gasto volumétrico es la cantidad de fluido que transporta una tubería a presión al atravesar una sección. Esta se calcula multiplicando el área de la sección, en este caso circular, por la velocidad que lleva el fluido. Las unidades en el Sistema Internacional (SI) son m^3/s , pero en el modelo se usan las unidades l/s , ya que los caudales en ciertas zonas no son muy elevados. $1 m^3/s$ equivale a $1000 l/s$ [32]:

$$Q = A \cdot v \quad (1)$$

donde:

$$Q = \text{Caudal que circula por una tubería (m}^3\text{/s)}$$

v = Velocidad del fluido (m/s)

A = Sección circular de la tubería (m²). Se calcula: $A = \pi r^2$

2.4.2 Presión

La presión de un fluido, por definición, es una magnitud que mide la fuerza que hace un fluido contra su superficie. En el Sistema Internacional (SI), esta se mide en Pascales (Pa), lo que equivale a 1 Newton/m², pero, cuando el fluido se trata de agua, lo ideal es usar la medida metros de columna de agua (mca). 1 mca equivale a la presión que ejerce una columna de agua de un metro de altura, y es exactamente igual a 9,806 kPa [31].

Cuando hablamos de presión dentro de un sistema, hay que diferenciar entre la presión absoluta y la presión manométrica. La presión absoluta es la suma de la presión atmosférica y la presión manométrica, y tiene como inicio de la escala el vacío. La primera de estas es la presión que ejerce el aire en condiciones atmosféricas, que suele rondar en torno a 1 atm (10,3 mca). El segundo componente de la presión absoluta, la presión manométrica, es la presión obtenida tras tomar mediciones, por lo tanto, puede ser tanto negativa como positiva [31].

Durante este TFG, siempre que hablemos de presiones, hablaremos de la presión manométrica; es decir, mediremos la diferencia que hay entre el punto de referencia y los demás puntos. El punto de referencia de la escala de la presión manométrica es el reservorio de Araka, ya que es el punto de partida del agua, donde la presión manométrica será igual a 0.

2.4.3 Ecuación de conservación de energía: Bernoulli

La ecuación de Bernoulli describe la conservación de energía entre dos puntos en una línea de corriente. La energía total que representa un fluido es la suma de la energía cinética, la energía potencial y la energía de presión. Estas energías, tras dividir las entre la gravedad y la masa, nos queda una magnitud con unidades de distancia (m). Por lo tanto, la altura total de un fluido representa la cantidad de energía por unidad de masa, y se consigue a través de la suma de tres magnitudes, la altura geodésica, la altura de presión y la altura cinética [32]:

$$H_T = h_p + z + h_v \quad (2)$$

donde:

h_p = Altura de presión (m)

z = Altura geodésica (m)

h_v = Altura cinética (m)

A través de la ecuación de Bernoulli, podemos describir la conservación de la altura en el interior de una tubería con la siguiente expresión [32]:

$$H_1 = H_2 + h_{f1-2} \rightarrow \frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad (3)$$

donde:

h_{f1-2} = Pérdida de carga debido a la fricción en las paredes (m)

p = Presión (Pa)

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

g = Aceleración gravitacional (m/s^2)

v = Velocidad del fluido (m/s)

En el modelo, el punto 1 siempre será el depósito de Araka y el punto 2 equivale a cualquier punto en la red. Estos puntos siempre comparan su altura total con la altura total de referencia, que es el punto 1. En el modelo, solo se puede medir la presión en los nodos.

Teniendo en cuenta que las velocidades en la red no son superiores a $2 m/s$, y la velocidad media de la red es de aproximadamente $0,1 m/s$, el aporte de la altura cinética a la altura total del fluido es casi despreciable. Es por eso por lo que la altura total del fluido viene dada casi exclusivamente por la altura estática, que es la suma de la altura geodésica más la altura de presión.

2.4.4 Altura piezométrica

La altura piezométrica se obtiene a través de la suma de las alturas estáticas, es decir, la altura geodésica y la altura de presión [32]:

$$H_T = h_v + h_{pz} \rightarrow h_{pz} = h_p + z \quad (4)$$

Como se ha comentado antes, la presión manométrica en el depósito de Araka es igual a 0 mca. Por lo tanto, la altura estática del punto 1 viene dada exclusivamente por la altura geodésica. El cálculo de la presión estática, sin tener en cuenta las pérdidas por fricción, sería el siguiente:

$$h_{est1} = h_{est2} \rightarrow z_1 = h_{p2} + z_2 \rightarrow z_1 - z_2 = h_{p2} \quad (5)$$

En la ecuación (5), se ve como la diferencia de alturas entre el depósito y un nodo determina la presión del nodo, la cual se mide en mca. Es decir, omitiendo las pérdidas por fricción y la altura cinética, la presión en los nodos varía únicamente por la diferencia de cotas de altura.

Para calcular las alturas piezométricas, se deben incluir las pérdidas por fricción, teniendo como resultado la siguiente expresión [32].

$$h_{pz1} = h_{pz2} + h_{f1-2} \rightarrow z_1 = h_{p2} + z_2 + h_{f1-2} \rightarrow z_1 - z_2 = h_{p2} + h_{f1-2} \quad (6)$$

2.4.4.1 Línea piezométrica

La línea piezométrica es la línea que se obtiene al unir las medidas de alturas piezométricas alcanzadas en todos los puntos. Esta línea representa gráficamente la altura estática que tiene cada punto. Para el cálculo de la línea piezométrica se tienen en cuenta las pérdidas de carga por fricción en las tuberías, y se obtiene un resultado como el que se puede observar en la Figura 7. Además, si se añade la altura cinética a la altura piezométrica, y trazásemos otra línea, se obtiene la línea de altura total. Esta nueva línea se situaría muy ligeramente superior a la línea

piezométrica, ya que, como se ha comentado antes, la altura cinética es casi despreciable comparándola con la altura piezométrica.

En la Figura 7 se expone un esquema del perfil de la RDA de Vitoria-Gasteiz. En la parte superior izquierda se encuentra la ETAP de Araka, y en la parte superior derecha el depósito de regulación de Gardelegi. La altura mínima en la red es de 499 metros, mientras que la máxima es de 583 metros, siendo esta variable según el nivel en el que se encuentre el reservorio de Araka.

En la parte superior se diferencian 3 líneas. La línea negra (a) equivale al nivel o línea estático, que es la que se forma al sumar las alturas estáticas sin tener en cuenta las pérdidas por fricción. Como se muestra en la ecuación (5), la altura estática será la misma en todos los puntos y por lo tanto la línea debe ser horizontal. Las líneas (b) y (c), muestran las alturas piezométricas de la red en horas llanas y en horas punta respectivamente. La diferencia entre la altura estática y la altura piezométrica es la pérdida de carga por fricción de la red. La línea roja (c) recoge mayores pérdidas por fricción que la línea verde (b) ya que en horas punta el caudal que circula por la red es mayor que en horas llanas y el rozamiento es mayor.

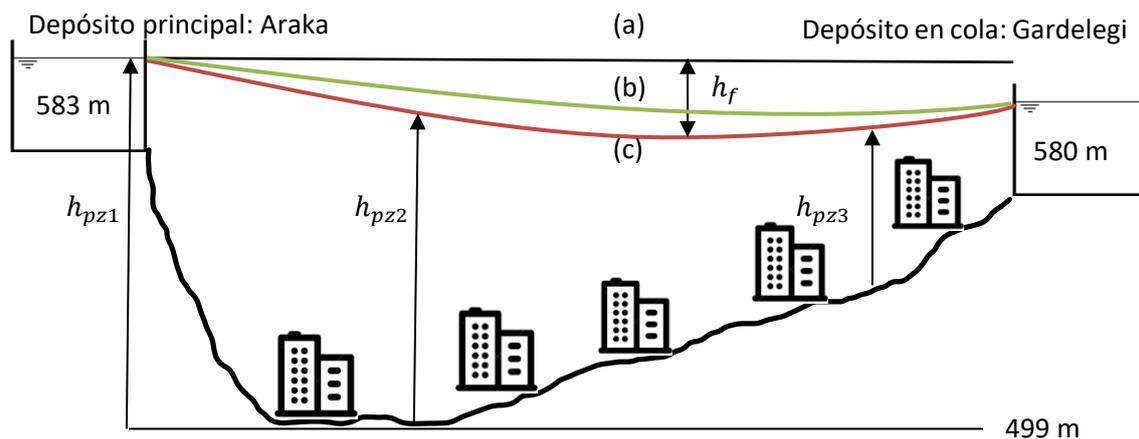


FIGURA 7. LINEAS PIEZOMÉTRICAS DE LA RDA DE VITORIA-GASTEIZ.

Siempre que la altura de los puntos de consumo de la RDA esté por debajo de la línea piezométrica (c), la presión de estos será positiva y el abastecimiento será posible. Si la altura geodésica del nodo de consumo se sitúa por encima de la altura piezométrica de la red, la presión sería negativa, y el abastecimiento por gravedad sería inviable. Por lo tanto, es necesario el empleo de bombas hidráulicas para aumentar la presión en aquellas zonas superiores a la línea piezométrica de la red, como es el caso de algunas localidades limítrofes a Vitoria-Gasteiz.

2.4.5 Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga tienen un efecto negativo en el comportamiento de las RDAs, reduciendo la energía del fluido a medida que transcurre por la red. Estas se clasifican en primarias o secundarias, dependiendo de en donde son originadas. Las primarias surgen principalmente por el rozamiento del fluido con las paredes internas de las tuberías con sección constante. En

cambio, las pérdidas secundarias se originan en los elementos adicionales que se añaden a la red, como son válvulas, codos, ampliaciones o reducciones de diámetro [33].

2.4.5.1 Pérdidas de carga primarias

EPANET ofrece tres fórmulas para calcular las pérdidas de carga primarias: Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chazy-Manning. En el modelo se usa la fórmula de Darcy-Weisbach, que es la más correcta teóricamente hablando. El cálculo de pérdida de carga se realiza con la siguiente expresión:

$$h_f = Aq^B \quad (7)$$

donde:

A = Coeficiente de resistencia

q = Caudal (m^3/s)

B = Exponente de caudal. $B = 2$ (Darcy-Weisbach)

El coeficiente de resistencia viene determinado por la siguiente expresión:

$$A = 0.0827f(\varepsilon, d, q)d^{-5}L \quad (8)$$

donde:

f = Factor de fricción, dependiente de ε , d , y q

ε = Coeficiente de rugosidad de la tubería (m)

d = Diámetro interior de la tubería (m)

L = Longitud de la tubería (m)

El coeficiente de rugosidad indica cuánto de rugoso es un material, y para la fórmula de Darcy-Weisbach se expresa en mm . A mayor coeficiente de rugosidad menos lisa será la superficie por la que circula el agua y con ello, mayor pérdida de carga. Los coeficientes varían dependiendo del material que se emplee, y los años de uso que tenga la tubería, ya que con el paso de los años las paredes se van desgastando y la rugosidad aumenta.

En el modelo no se contemplan estas variaciones temporales, ya que no se dispone del dato del momento de instalación de todas las tuberías. Por lo tanto, se establecen los siguientes coeficientes fijos:

TABLA 1. COEFICIENTES DE RUGOSIDAD.

Material	Coeficiente de rugosidad (ε)
PE	0,002
FC	0,01

FD	0,15
HCC	0,3
FG	0,5
Resto	0,03-3

2.4.5.2 Pérdidas de carga secundarias o menores

Las pérdidas de carga menores causadas por los accesorios de la red se calculan con la siguiente expresión:

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

donde:

K = Coeficiente de perdida menores

En el modelo solo se contemplan las perdidas menores causadas por ciertas válvulas. En 2010, se hicieron calibraciones del modelo, y tras compararlo con los datos reales, se decidió introducir unos coeficientes de perdida elevados en unas pocas válvulas para ajustar los datos a la realidad. Estos coeficientes se mantendrán en la actualización.

2.4.6 Mallas cerradas

Un sistema mallado permite que el agua llegue a destino por diferentes caminos. El método Hardy-Cross establece dos principios hidráulicos básicos que se cumplen en las mallas cerradas [33].

- A causa del principio de conservación de la masa, la suma de los caudales entrantes y salientes en cada nodo es nula.

$$\sum_i Q_i = 0 \quad (10)$$

- A causa del principio de la conservación de energía, la suma algebraica de las pérdidas de carga en cada una de las líneas que componen la malla es nula (ABE, ACDE).

$$\sum h_f = 0 \quad (11)$$

En la Figura 8 se muestra un esquema de una malla simple, como las que se encuentran en la RDA de Vitoria-Gasteiz, para facilitar la comprensión de los dos fundamentos mencionados. La ecuación (10) establece que todo caudal que entra a un nodo debe salir, ya sea por medio de otra tubería o a través de una demanda modelada. La ecuación (11) mantiene que, al sumar las pérdidas de carga de manera algebraica del mismo modo que en las leyes de Kirchoff, el agua sufrirá las mismas perdidas de carga por ambas líneas de la malla. Es decir, las pérdidas que sufre

el caudal que circula por la línea ABE pierde la misma energía que el caudal que circula por la línea ACDE.

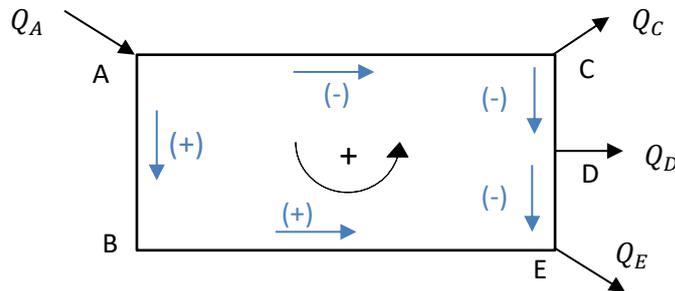


FIGURA 8. ESQUEMA MALLA CERRADA.

2.4.7 Análisis hidráulico

EPANET establece un modelo de simulación hidráulica que calcula las alturas en los nudos y los caudales en la red para un conjunto fijo de reservorios o tanques y demandas durante un periodo determinado de tiempo. El periodo temporal consiste en una sucesión de tramos temporales, que en el caso del MD de la RDA de Vitoria-Gasteiz equivalen a una hora. Los niveles de los reservorios y las demandas se actualizan cada tramo temporal según sus patrones temporales establecidos [19].

Para calcular las alturas y caudales en un momento específico se necesita resolver simultáneamente las ecuaciones (10) para cada nodo de la red y (3) para cada tubería. Este procedimiento se conoce como equilibrado hidráulico de la red, y para su resolución se emplea la técnica iterativa desarrollada por Todini en 1988, llamada Algoritmo del Gradiente Global [19]. Esta no se va a explicar ya que requiere conocimientos más técnicos para ser entendida y se considera que no aporta lo suficiente en la comprensión de este TFG como para introducir una explicación detallada.

EPANET permite dos opciones en la modelación de la demanda en los nodos para el análisis hidráulico: análisis basado en la demanda y análisis basado en presiones. La opción de análisis empleada en el modelo es la más clásica, la primera. En ella se introducen los caudales de demanda en los nodos y el software se encarga de calcular el resto de las variables [19]. Por lo tanto, si contemplamos la RDA de Vitoria-Gasteiz como una gran malla, tenemos la siguiente ecuación:

$$\sum Q_{in} = \sum_i D_i \quad (12)$$

donde:

Q_{in} = Caudal entrante a la red (l/s)

D_i = Demanda fijada en nodo (l/s)

2.5 Infraestructura AMVISA

AMVISA se encarga de dar un servicio integral del agua a Vitoria-Gasteiz, así como a poblaciones dentro del municipio y a los municipios colindantes de Arzua-Ubarrundia, Legutio y Zigoitia. Para ello cuenta con una infraestructura totalmente capaz, la cual se ve en la Figura 9. Para dar servicio a la población, AMVISA cuenta con 4 captaciones de agua: El embalse de Ullibarri, el río Zadorra, el embalse de Albina y el embalse del Gorbea. El agua proveniente de las 3 primeras captaciones de potabiliza en la ETAP de Araka, desde donde se distribuye a los consumidores, mientras que el agua que viene desde la captación del Gorbea cuenta con su propio tratamiento.

Esta infraestructura cuenta con 743 km totales de red, que en su mayoría pertenecen a la red de Vitoria-Gasteiz. La red principal cuenta con el soporte de tres depósitos idénticos que en conjunto suman una capacidad de almacenaje de $90.000 m^3$. Estos están situados en la ETAP de Araka y de estos depósitos proviene el 99% del agua servida a la población. Para reforzar la presión del agua en la zona sur de Vitoria, se cuenta con un depósito en Gardelegi de $13.000 m^3$ de capacidad. En el esquema que se ve en la Figura 5, la ETAP de Araka sería el depósito principal, y el depósito de Gardelegi, el depósito en cola.

Existen dos zonas de abastecimiento en baja que están totalmente desconectadas de la red general: Mandojana y Ullibarri de los Olleros. La zona de abastecimiento de Gorbea también se puede considerar como externa a la red general, ya que se abastece únicamente de la ETAP del Gorbea. Tras abastecer a la zona, el excedente de agua potable se une a la red general de Vitoria-Gasteiz, tras pasar por una mantenedora de presión en Apodaka. Por lo tanto, se considera que la red de Vitoria-Gasteiz cuenta con una fuente de abastecimiento secundaria, que es mucho más ínfima que la principal.

Para hacer llegar el agua a los pueblos, o localidades, más alejados y elevados, la red cuenta con 15 estaciones de bombeo y 13 depósitos en la red. Como se puede observar en la Figura 9, estos depósitos y estaciones de bombeo están situados en las zonas rurales, unidos por ramales al anillo principal de distribución de la ciudad. Estos depósitos y bombeos no están incluidos en el modelo inicial, ni tampoco se incluirán en la actualización, excepto dos de ellos, el depósito de Gardelegi y el depósito del Sector-19. El depósito de Gardelegi es el más importante tanto por la demanda de agua como por el número de población que depende de él.

El depósito del Sector-19 sirve como regulador para abastecer la antigua área llamada Sector-19, hoy conocida como Goikolarra, y se abastece directamente a través de un bombeo desde el depósito de Gardelegi. El resto de los depósitos y bombeos tienen como finalidad abastecer a poblaciones rurales pequeñas, que apenas tienen influencia en la red.



FIGURA 9. INFRAESTRUCTURA AMVISA. FUENTE: [30].

3 Situación de partida de la red de abastecimiento 2010

En este apartado se presenta el modelo inicial de la RDA de Vitoria-Gasteiz. Se muestra el trazado, los elementos que la componen, así como la demanda y los patrones de consumo que la caracterizan. Esta red fue comprobada y validada en 2010, tras una comparación con mediciones reales en la red y el MD.

3.1 Red inicial

En el mapa de la Figura 10 se observa la red de abastecimiento que data del año 2010. Alrededor del mapa se pueden ver las coordenadas geodésicas del mapa, las cuales pertenecen a la Zona 30N del sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator). En el apartado inferior izquierdo se encuentra la leyenda, donde se ve cómo en el mapa solo se han incluido las tuberías y el reservorio de Araka. Para que sea de visualización sencilla se han omitido las válvulas, nodos y “demands” de la imagen. El depósito de Gardelegi y la captación del Gorbea están modeladas como nodos de consumo, que luego se explicarán detalladamente, mientras que el depósito del Sector-19 no aparece, ya que fue construido posteriormente. En la zona inferior derecha, se muestra la escala elegida. Este marco es el mismo para todas las imágenes de la red.

Esta red fue modelada en el año 2010 y desde entonces Vitoria-Gasteiz ha sufrido algunos cambios. A lo que la ciudad respecta, se ha expandido urbanísticamente hablando tanto en barrios residenciales como en áreas industriales. Los barrios con mayor expansión han sido los barrios de Salburua y Zabalzana. Adurza también ha acogido varios edificios nuevos, y en la zona sur, un nuevo barrio llamado Goikolarra ha surgido en los últimos años. En cuanto a industria, numerosas empresas se han asentado en el polígono industrial de Jundiz, ubicadas en la zona que queda más al oeste. En la Figura 36. Anexo III se ha recogido un mapa de los barrios de Vitoria-Gasteiz, para facilitar la localización de las zonas que se hablan.

Antes de poder realizar análisis en esta red, primero hubo que corregir varios errores que tenía la red. Básicamente, se corrigieron algunos trazados, se modificaron algunos diámetros y se abrieron todas las válvulas que estaban cerradas. A continuación, se van a presentar las características principales de la red.

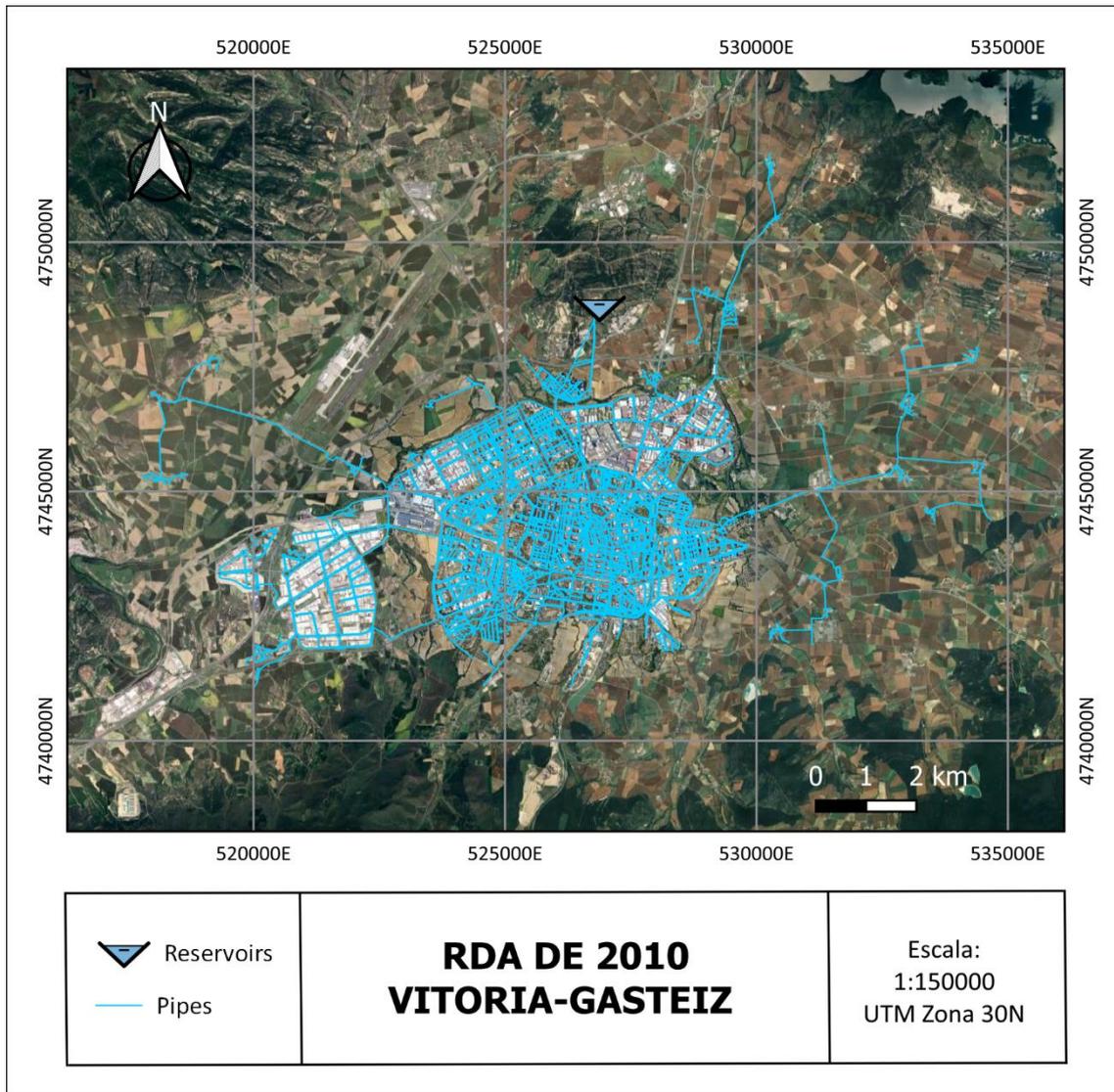


FIGURA 10. RED DE ABASTECIMIENTO DE VITORIA-GASTEIZ AÑO 2010.

3.2 Elementos de la red

Como ya se ha mencionado en el apartado 2.3.2, la red cuenta con numerosos elementos. En la Tabla 2 se puede ver un resumen de los elementos que conforman el modelo, y a su lado, la simbología que representa cada elemento en el software de QGISRed en la Figura 11.

TABLA 2. ELEMENTOS EN LA RED.

Elemento	Nº
Tuberías	19628
Nodos	21760
Valvulas	3472
Depósitos	1
Demands	138



FIGURA 11. SIMBOLOGÍA DE ELEMENTOS EN QGIS.

3.2.1 Tuberías

En el modelo de 2010 se encuentran un total de 19.628 tuberías modeladas, que forman más de 590 km de red. A estas se les aplica un coeficiente de rugosidad específico según el material, lo que nos ayudará a distinguirlas. En la Tabla 3 se recoge un resumen del número de tuberías y la distancia total de estas, así como los menores y mayores diámetros, y su coeficiente de rugosidad, dependiendo del material que se emplee. También se muestra el peso en porcentaje que tienen estos materiales en la red. Las tuberías de FD son las más utilizadas en Vitoria, con un uso del 58 %, seguidas de las de FC y PE.

TABLA 3. TUBERÍAS EXISTENTES.

Tuberías Existentes						
Coef. Rug. (k)	Material	Nº de tuberías	Metros	Porcentaje	Menor D	Mayor D
0,002	PE	2087	53393,0	9,0%	20,4	204,6
0,01	FC	5681	167767,9	28,3%	40,8	600
0,15	FD	11110	342205,2	57,7%	50	1200
0,3	HCC	103	12851,2	2,2%	500	1200
0,5	FG	551	13520,4	2,3%	40	600
0,03-3	Resto	96	3544,1	0,6%	15	800
TOTAL		19628	593281,8	100%	15	1200

3.2.2 Válvulas

En el modelo desactualizado el número total de válvulas asciende a 3512. Estas válvulas están determinadas como tipo TCV (Throttle Control Valve) y permiten aplicarle un coeficiente de pérdidas. Casi todas las válvulas tienen un coeficiente de pérdidas igual a cero, es decir, que no se producen pérdidas de carga en las válvulas cuando están completamente abiertas. Sin embargo, hay 13 válvulas que sí tienen aplicado un coeficiente, ya sea porque se utiliza otro tipo de válvula o porque fue necesario en la calibración del modelo.

3.2.3 Nodos

Para la modelización de la red de Vitoria-Gasteiz fueron necesarios más de 20.000 nodos. Casi 7.000 de ellos pertenecen a los nodos de entrada y salida de las válvulas. Más de la mitad de los nodos son generados únicamente en el diseño de la red, por lo tanto, su demanda es igual a 0. Es decir, solo sirven de unión entre dos o más tuberías. Solo una pequeña fracción del total de los nodos realmente contienen demanda. Además, cabe mencionar que hay tres nodos especiales, los cuales pertenecen al depósito de Gardelegi, la zona de Albina y el embalse del Gorbea. La Tabla 4 resume esta información.

TABLA 4. RESUMEN DE NODOS.

Nodos	Nº
Nodos de valvulas	6944
Nodos con Demanda	3516
Nodos sin Demanda	11297
Nodos especiales	3
Total	21760

3.2.3.1 Nodos con “Demands”

En la red de 2010, hay nodos que tienen incluidas 2 demandas. Estas demandas se muestran como puntos llamados “Demands”, y se utilizaron para diferenciar las demandas de riego de las demás. Por lo tanto, los 69 nodos que tienen “Demands”, incluyen 2 demandas. Una de estas siempre va a corresponder a una demanda de riego, y la otra a un consumo de habitantes, que puede ser igual a 0 o mayor.

3.2.4 Patrones de consumo

Los patrones de consumo sirven para simular el comportamiento que tienen los nodos dependiendo de la hora del día. Los nodos de consumo siempre van a tener una demanda positiva. El caudal de la demanda varía dependiendo de la franja horaria en donde se encontró el modelo, formando una curva que representa e imita el consumo de los habitantes en Vitoria-Gasteiz.

3.2.4.1 Demandas zonales (QDZ)

En el modelo existen 13 patrones de demanda zonales diferentes que se modelizaron en su día para diferenciar las demandas que puede haber en las zonas industriales, zonas rurales o zonas residenciales. Dependiendo de la zona residencial estas demandas también pueden variar. Sin embargo, más de un 50% de los nodos se rigen por la curva de demanda QDZ13, la cual podemos ver en la Figura 12. Esta representa la variación de un consumo residencial de agua a lo largo del día.

En la curva QDZ13, como en todos los demás patrones de consumo llamados QDZ, el caudal medio es de 1 l/s. A los nodos de consumo, se le aplica un valor de demanda. Por lo tanto, si un nodo tiene una demanda de 0,5 l/s de media diarios, se le debe aplicar un valor de 0,5 en el apartado de demanda. Para saber la demanda real de ese nodo en cada franja horaria, basta con multiplicar el valor de demanda del nodo, con el multiplicador de la franja horaria del patrón de demanda. Entre las ocho de la mañana y las tres de la tarde, ese consumo de agua es mayor a la media, por lo tanto, se le aplica un coeficiente mayor que el valor uno. En el resto de las horas del día, el coeficiente es menor que uno. El caudal medio de 1 l/s indica que la media de los multiplicadores es igual a uno.

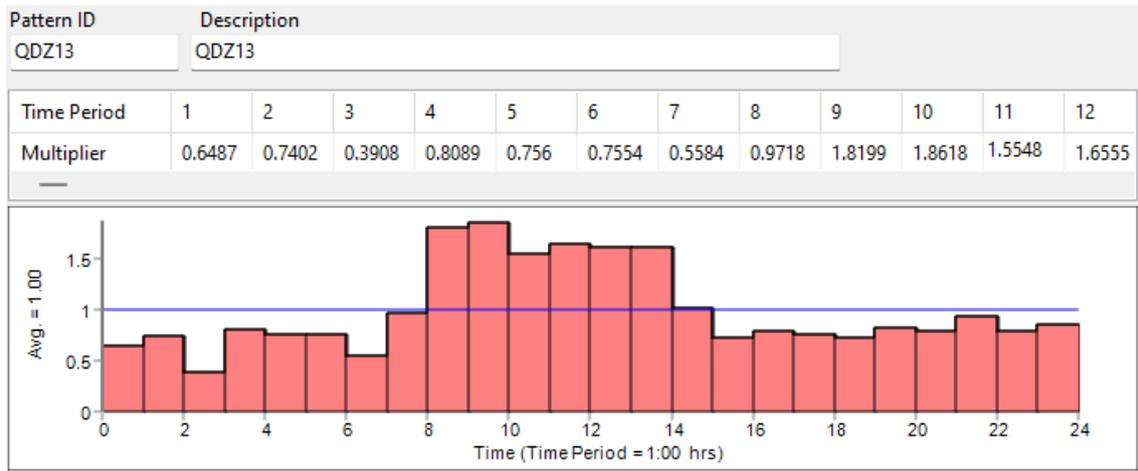


FIGURA 12. PATRÓN DE DEMANDA DIARIO.

3.2.4.2 RIEGO

La demanda de agua que la RDA requiere para mantener las zonas verdes de la ciudad también se contempla en el modelo. El patrón de riego es diferente al resto, ya que solo tiene un consumo nocturno. Este se activa a las doce de la noche y finaliza a las ocho de la mañana. Como se ha explicado antes, este patrón de demanda solo se emplea en los nodos llamados "Demands". En este caso, el consumo medio es de 0,33 l/s. Por lo tanto, el valor de demanda aplicada a las "Demands" de riego se corresponde justamente con el caudal que el riego emite cuando esta activado, ya que el multiplicador es igual a uno.



FIGURA 13. PATRÓN DE DEMANDA DE RIEGO.

3.2.4.3 ZONA DE ALBINA

Desde los depósitos situados en Araka, una tubería de 500 mm abastece la zona que se sitúa al norte de la ETAP, que abarca tanto el parque de Miñano como el polígono de Gojain y varias localidades. En la Figura 9, se muestra en color azul claro esta tubería que sale del depósito superior de la ETAP. Este abastecimiento está representado como un nodo de consumo y cuenta con su propia curva de demanda, cuyo caudal varía entre los 21 l/s y 38 l/s según el momento del día y tiene una demanda media de 28,26 l/s.

3.2.4.4 GARDELEGI - SECTOR-19

El depósito de Gardelegi se expresa mediante un nodo de consumo. Este nodo de consumo tiene valores tanto positivos como negativos, dependiendo si está cogiendo o aportando agua a la red. El propósito del nodo de Gardelegi es el de mantener una adecuada presión en la zona sur de Vitoria-Gasteiz. También, de este depósito se abastece gran parte del barrio de Goikolarra de Vitoria-Gasteiz y los pueblos de Arechavaleta y Gardelegi. En la Figura 14 se observa como durante las horas nocturnas el depósito tiene multiplicadores positivos, es decir, el depósito se está llenando, mientras que en las horas de la mañana los multiplicadores son negativos, es decir, está aportando agua almacenada a la red. Hay un rango de horas en la tarde, de las 16:00 a las 22:00 en las que el depósito se mantiene cerrado. La media que nos deja este patrón es de 7 l/s, o lo que es lo mismo, los habitantes que dependen exclusivamente de este depósito, y no están conectados a la red de Vitoria consumen un caudal medio diario de 7 l/s.

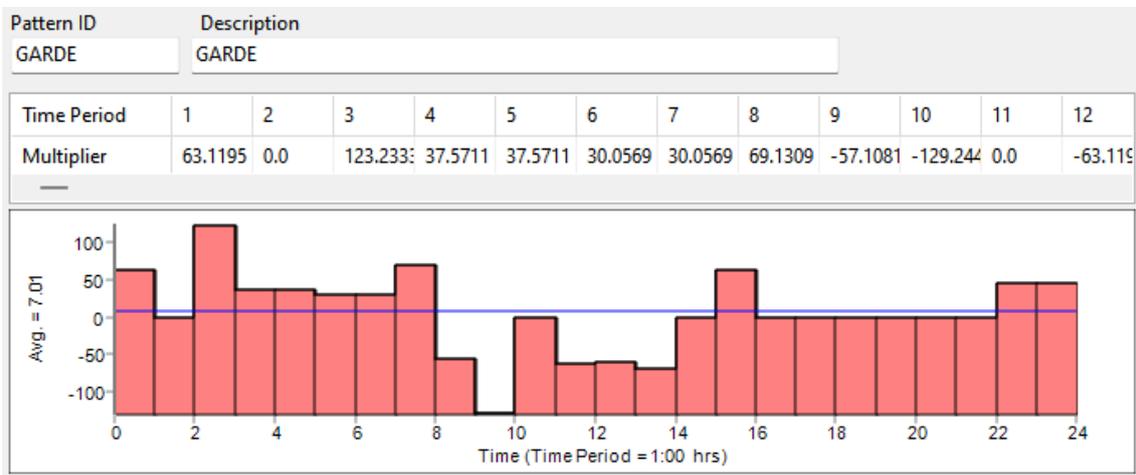


FIGURA 14. PATRÓN DE DEMANDA DEL DEPÓSITO DE GARDELEGI.

3.2.5 Demanda

La demanda total de los nodos comunes está representada en la Tabla 5. En ella se expone que la demanda total de la red es de aproximadamente 806 l/s, o lo que es lo mismo, 2.902 m³/h. AMVISA en 2010 abastecía en baja a un total de 239.657 habitantes, todos ellos situados dentro del municipio de Vitoria-Gasteiz, menos Durana y Mendibil. En el modelo, algunas localidades pequeñas con demandas de agua ínfimas a los que abastece AMVISA no están contemplados. Las zonas rurales del municipio de Vitoria-Gasteiz, contaban con un total de casi 5000 habitantes. Suponiendo que alrededor de un 65 % de la demanda de estas localidades está contemplada en el modelo, se obtiene aproximadamente un total de 238.000 habitantes contemplados. Por lo tanto, el consumo de agua total por habitante al día se establecería en unos 292 litros.

TABLA 5. RESUMEN DE DEMANDAS.

Tipo Demanda	Nº	Media diaria	Total (l/s)
Demanda Garde	1,0	7,0	7,0
Demanda Albina	1,0	28,3	28,3
Demanda Nodos	675,4	1,0	675,4
Demands QDZx	23,4	1,0	23,4
Demands Riego	217,8	0,3	71,9
Total Demanda			805,9

Probablemente, en la realización de este modelo se utilizaron datos obtenidos de años anteriores a 2010, ya que los resultados del consumo se presentan transcurrida buena parte del año siguiente. En 2009 la media de consumo anual fue de 250 l/hab al día. Comparando este consumo con el del modelo, hay una variación de unos 40 l/hab diarios. Además, el total de agua remitido a la red en 2009 fue de 21.7 millones de m^3 , que comparados con los 25.4 millones de m^3 que contempla el modelo, deja ver que el MD estaba excesivamente demandado.

3.2.6 Suministros de Agua

El principal suministro de agua a la red de Vitoria-Gasteiz viene de los depósitos situados en la ETAP de Araka, y como suministro secundario, el embalse del Gorbea.

3.2.6.1 Araka

Los depósitos de Araka reciben un flujo constante de agua que viene de la propia ETAP, por lo que nunca deben llegar a vaciarse. Para simular esto en el modelo, se ha colocado una reserva. Esta reserva de agua es teóricamente infinita, y puede proporcionar un caudal constante a la red. Sin embargo, la altura de los depósitos no es siempre la misma, a medida que se van llenando o vaciando la altura de estos varia. Por lo tanto, la cota máxima de la red también varia con estas fluctuaciones de altura.

Para simular estas variaciones, se realizó un patrón de altura. Al igual que con los patrones de demanda, al patrón de altura se le aplica un multiplicador a cada franja horaria. La altura máxima del depósito vendrá dada por la cota media del depósito (582,931 m) multiplicada por el multiplicador. Esto es importante ya que cuanto más cota tenga el depósito, mayores presiones ofrecerá a la red. En la Figura 15 se puede ver como la media de los multiplicadores es igual a 1.

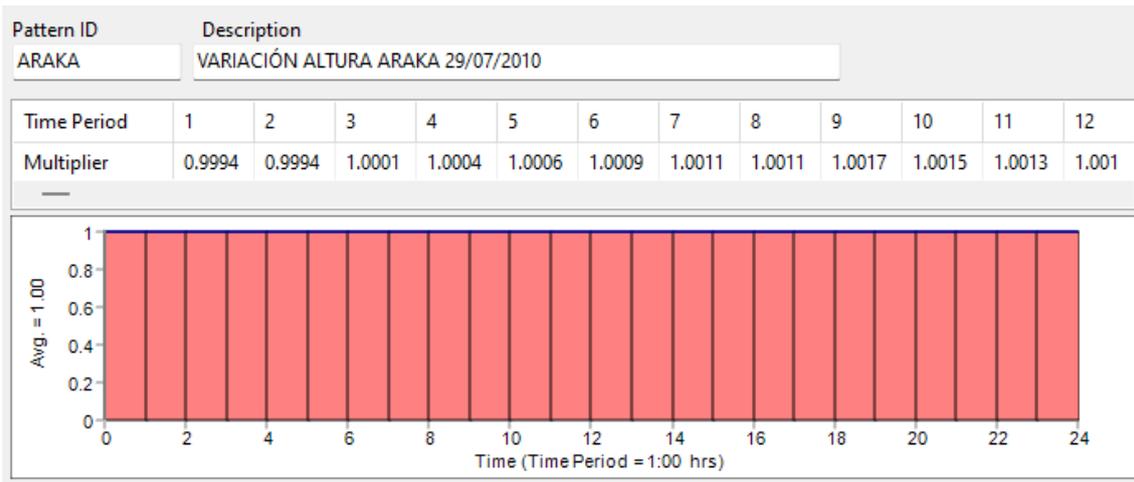


FIGURA 15. VARIACIÓN DE ALTURA DEL DEPÓSITO DE ARAKA.

En la Figura 16 se expone la variación de altura real que se da en los depósitos de Araka. A partir de las ocho de la mañana los depósitos empiezan a vaciarse hasta las ocho de la tarde, donde la ETAP de Araka comienza a bombear agua para reestablecer los niveles de los depósitos. Hay que recordar que los tres depósitos están conectados y funcionan de manera conjunta, por lo que al hablar de los depósitos de Araka o la reserva de Araka, la referencia es la misma.



FIGURA 16. VARIACIÓN DE ALTURA TOTAL DE LOS DEPÓSITOS DE ARAKA.

3.2.6.2 Gorbea

El embalse del Gorbea también aporta una cantidad de agua considerable en el modelo. En este caso, este abastecimiento a la red está modelado como un nodo de consumo, el cual tiene valores negativos indicando el caudal que aporta en cada momento. Cuanto más negativo sea el número, mayor cantidad de agua estará aportando a la red este nodo. Dicho esto, en la Figura 17 se presenta el patrón de aporte de agua potable que genera el embalse del Gorbea. De media, aporta un caudal diario de 17 l/s.

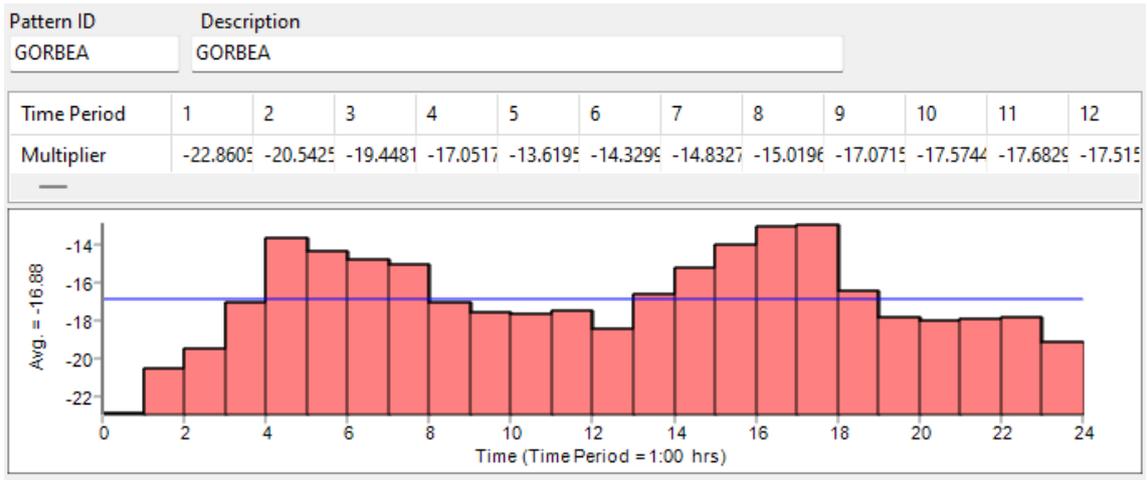


FIGURA 17. PATRÓN DE EQUIVALENCIA EMBALSE DEL GORBEA.

4 Proceso de actualización

La RDA de Vitoria-Gasteiz, en general, no ha sufrido grandes cambios desde 2010. AMVISA ha pasado de abastecer a 239.657 habitantes en baja [34], a llegar a los 253.987 habitantes en 2022 [30], aproximadamente 14.000 habitantes más que en 2010. Hoy en día, se estima que AMVISA abastece de agua potable a más de 255.000 habitantes.

Un cambio importante en la red de Vitoria-Gasteiz, es la construcción del depósito del Sector-19. Este depósito se construyó para dar servicio a la rápida expansión que estaba sufriendo el barrio de Goikolarra y brindar las presiones necesarias. Por las noches, un bombeo desde el depósito de cola de Gardelegi impulsa el agua 50 metros más arriba hasta este depósito, el cual se vacía durante el día (ver Figura 37. Anexo IV). Este depósito se ha incluido en la actualización.

El proceso de actualización consta de varias fases. La primera de ellas es la renovación de todos los tramos de red que ha habido desde 2010 hasta inicios de 2024. La segunda fase ha sido la actualización de la demanda, empezando por los patrones de los nodos principales de Gardelegi, S-19 y Albina. Por último, se ha hecho un cálculo de la demanda actual, y para incorporarla se han tomado en cuenta las nuevas edificaciones en la ciudad.

Además, en la Figura 18 se puede apreciar que las localidades situadas al norte del aeropuerto de Foronda están conectadas a la RDA de Vitoria-Gasteiz. Esto es un caso de estudio que se ha realizado para incorporar en un futuro la red autónoma de Mandojana a la RDA general. Esta obra se pretende realizar en no más de un año, es por ello por lo que se ha incluido en la actualización.

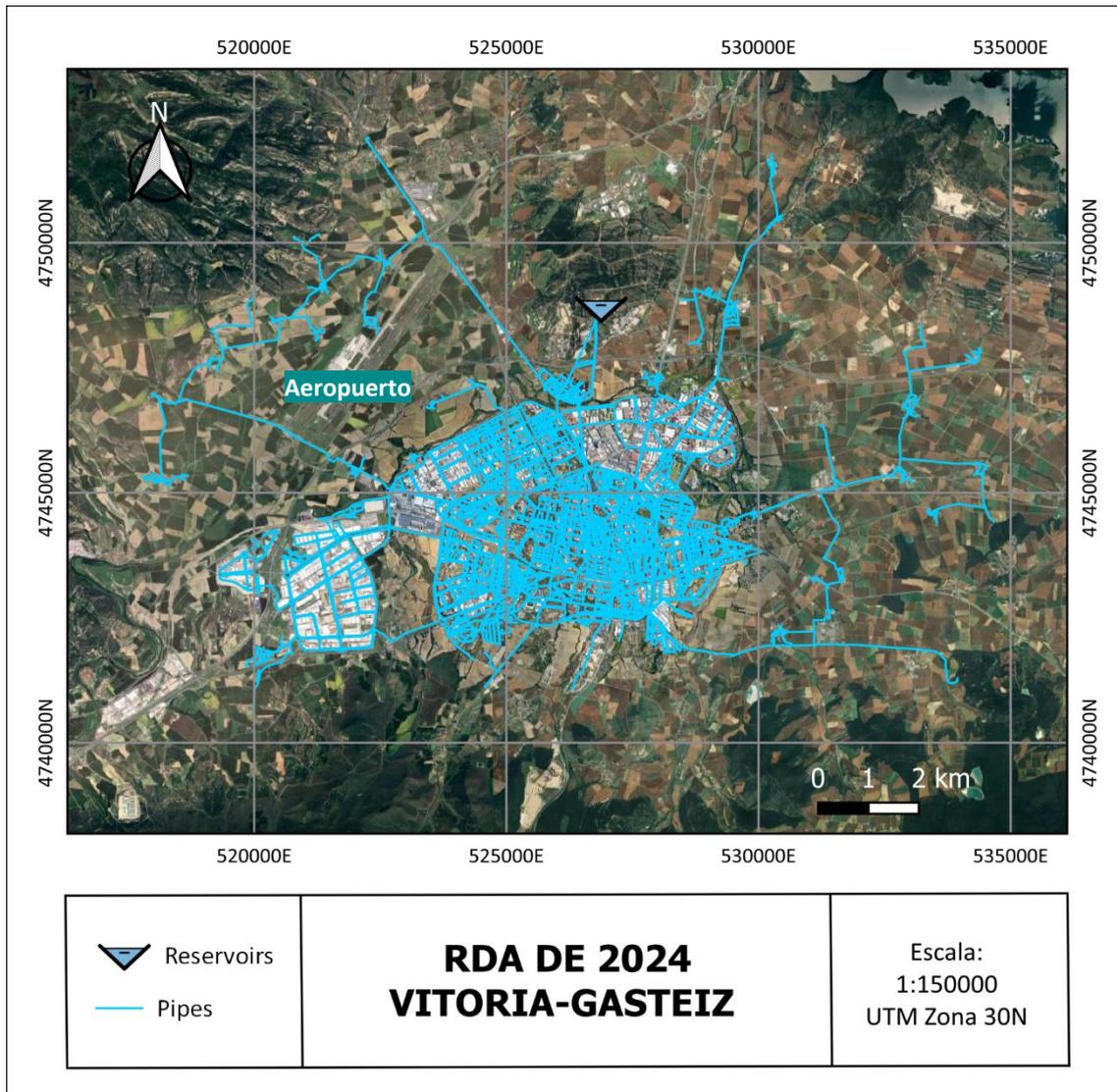


FIGURA 18. TRAZADO RED 2024.

4.1 Actualización de trazado

4.1.1 Tuberías

En la Figura 19 se puede ver todo el trazado que se ha renovado desde que se diseñó el MD en 2010. En el MD se han incluido todos estos tramos renovados, excepto los que dependen de un bombeo en las zonas rurales. Estos tramos ínfimos de red los encontramos mayoritariamente en la zona rural este.

También hay que mencionar la omisión de la zona del barrio de Goikolarra y los pueblos de Arechavaleta y Gardelegi que dependen casi exclusivamente del nuevo depósito del Sector-19. Esta zona de red está casi completamente desconectada de la RDA de Vitoria-Gasteiz, y sus presiones dependen principalmente del nuevo depósito, por lo que funciona casi como una red diferente. Ver Figura 37. Anexo IV.

Al principio, se trató de incorporar la red de Goikolarra al sistema, pero a la hora de realizar los análisis, los resultados obtenidos no eran correctos en esa zona y alteraban el MD. La simulación real de los 2 depósitos (Gardelegi y S-19) junto con la red de Vitoria-Gasteiz y la red de Goikolarra no ha sido posible dentro de un mismo modelo. Entonces, para que los resultados obtenidos no sean erróneos y de cara a realizar una modelización más sencilla, se ha decidido eliminar esta red del modelo.

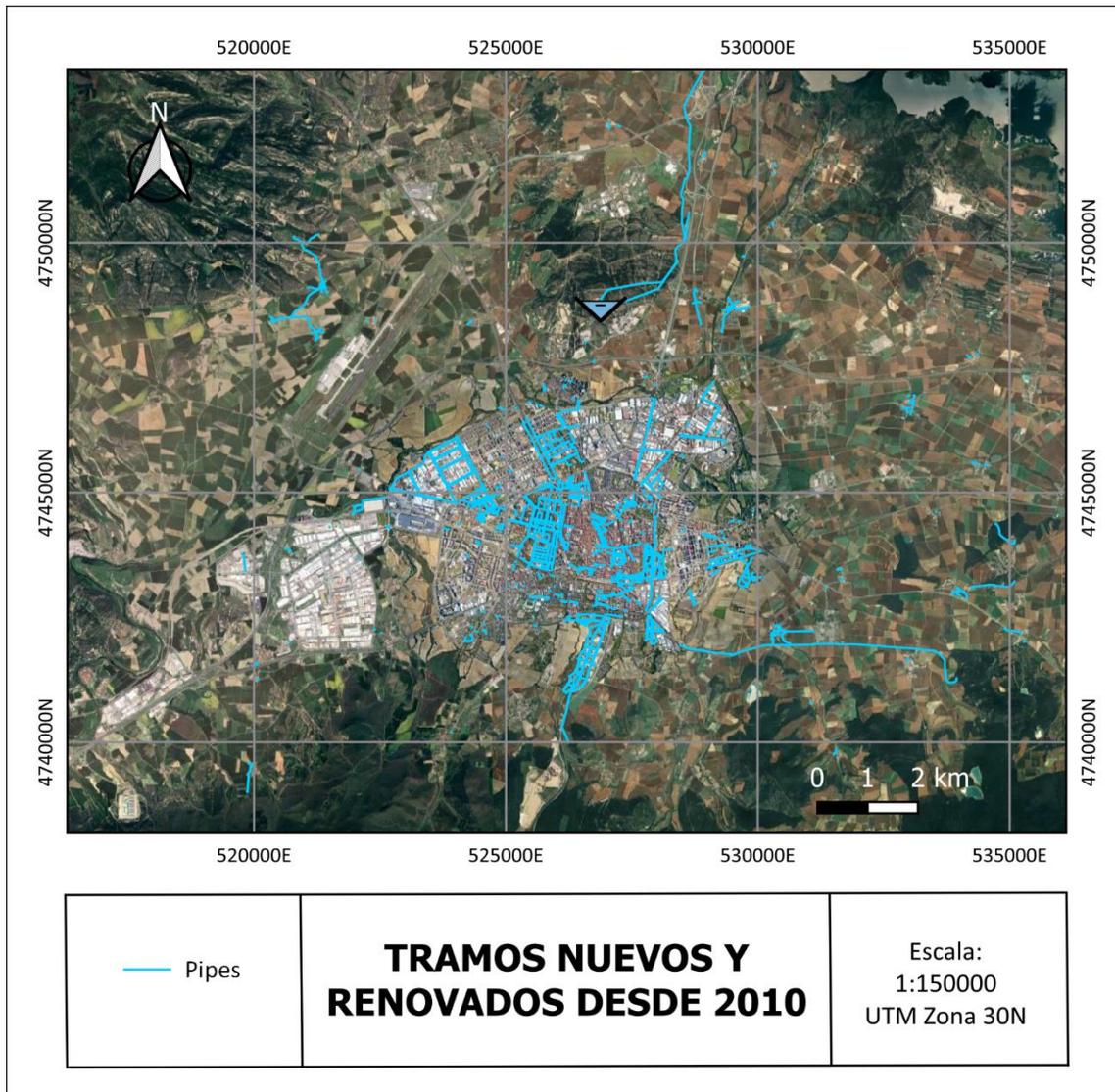


FIGURA 19. TRAMOS DE RED RENOVADOS DESDE 2010.

Principalmente, se ha tratado de eliminar las tuberías de FC y sustituirlas por tuberías de FD en las zonas donde se necesitan mayores diámetros y PE en aquellas zonas con menores necesidades de caudal. Si nos fijamos en los coeficientes de rugosidad, puede verse contradictorio sustituir tuberías de FC para incorporar tuberías de FD, ya que la pérdida de carga en la red será mayor. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado 2.3.2.1, las tuberías de FC contienen amianto, material el cual su uso y comercialización lleva prohibido más de 20 años. Es por ello por lo que la estrategia que sigue AMVISA, así como todas las entidades que gestionan redes a nivel nacional, es la de retirar por completo estas tuberías. Además, las

tuberías de FD tienen una garantía de tiempo de uso muy elevadas, brindando mayor seguridad a la red [23].

En la modelización hay que destacar varias cosas. Lo primero es la construcción de nuevos tramos de red. En el barrio de Salburua mayoritariamente y en la zona sur del barrio de Adurza se han incorporado nuevos tramos de red que antes no existían, debido a sus expansiones. Lo segundo es la incorporación de una tubería de aproximadamente 6 km de longitud en la zona rural sureste de Vitoria-Gasteiz. De esta manera se consigue crear una malla en esa zona, para que el abastecimiento de agua a los numerosos pueblos comprendidos en ese sector pueda llegar por ambos sentidos. Por último, hay que destacar la incorporación de otra gran malla en la zona rural noroeste, la cual se detallará en el caso de estudio.

En la Tabla 6 se expone un resumen de las tuberías de la RDA de Vitoria-Gasteiz una vez introducidos todos los cambios. Durante estos años, se ha conseguido reducir en un 50 % el uso de tuberías de FC, y el porcentaje que ocupan ahora las tuberías de hierro de FD llega hasta el 70 %. El uso del PE ha aumentado un 2,5 %, y el resto de los materiales ha disminuido levemente.

TABLA 6. RESUMEN NUEVO TRAZADO.

Tuberías Trazado Renovado						
Coef. Rug. (k)	Material	Nº de tuberías	Metros	Porcentaje	Menor D	Mayor D
0,002	PE	2249	73124,3	11,6%	20,4	458,4
0,01	FC	3104	90678,9	14,4%	50	600
0,15	FD	14158	441758,4	70,0%	50	1250
0,3	HCC	102	12739,3	2,0%	400	1200
0,5	FG	389	10090,8	1,6%	40	600
0,03-3	Resto	92	2274,9	0,4%	15	900
TOTAL		20094	630666,6	100%	15	1250

La capacidad total de almacenamiento de agua de la RDA de Vitoria-Gasteiz modelada es de $29.783 m^3$. Si a esto le sumamos los $385 m^3$ de red no incluida de Goikolarra, la red supera los $30.000 m^3$ de capacidad. Es decir, dentro de la red general hay más de $30.000 m^3$ de agua a presión, el volumen que tiene cualquiera de los tres tanques de Araka. Si se suman los depósitos principales de Araka, el depósito de Gardelegi, el almacenamiento en la red, la capacidad total de la red es de más de $135.000 m^3$.

4.1.2 Válvulas

El principal cambio en las válvulas ha sido aplicar un coeficiente de pérdidas (K) a todas las válvulas que no contaban con uno específico. A las válvulas que contaban con un coeficiente propio (en total 13), se les ha mantenido dicho coeficiente. Al resto de válvulas, siguiendo la recomendación de EPANET, se les ha aplicado un coeficiente con valor de 0,2.

Teniendo en cuenta que la velocidad media del agua al pasar por las válvulas es de alrededor de 0,1 m/s, la pérdida de carga sufrida en la mayoría de las válvulas es casi inexistente. Es decir, en una válvula de bola totalmente abierta se produce una pérdida de carga aproximada de

0,0001 mca cuando el agua circula a 0,1 m/s. Dado que en estas válvulas no se producen apenas pérdidas de carga, en los tramos donde había que incorporar nuevos tramos de red (Salburua, Adurza), no se han introducido todas las válvulas al detalle. Se entiende que para el cálculo hidráulico apenas tienen importancia y son despreciables.

4.2 Actualización de demanda

El agua remitida a la red en el año 2022 fue de exactamente $18.852.314 \text{ m}^3$. En los últimos diez años, el agua remitida ha estado siempre entre los valores de 18 y 19 millones de m^3 anuales, por lo que el aumento constante de la población alavesa no ha hecho que el consumo de agua total crezca. De hecho, el consumo por habitante medio diario se ha reducido de los 250 l en 2009 a 202 l en 2022 [35]. A pesar de que el municipio de Vitoria-Gasteiz haya pasado de tener alrededor de 240.500 habitantes en 2010 a superar los 258.000 habitantes en 2024, el gasto por habitante se ha reducido [36]. En el modelo, se ha aproximado que los habitantes contemplados en 2010 eran 238.000, y de igual manera que la explicada anteriormente, en 2024, se han estimado un total de 256.000.

Dividiendo el agua total remitida entre los 256.000 habitantes contemplados, el resultado queda en aproximadamente 202 litros al día por habitante (mismo consumo que en 2022). Si pasamos el agua total remitida de $\text{m}^3/\text{año}$ a l/s , tenemos un gasto total de aproximadamente 598 l/s . Por lo tanto, la demanda total a aplicar en el MD no debe ser inferior a esa cifra. Así el total de agua remitida a la red sería parecido al de 2022 manteniéndose constante como en los últimos diez años.

El MD actual se contempla en un escenario neutral o cerca de la media, como pueden ser los meses de mayo u octubre. QGISRed permite aplicar un multiplicador general de demanda a la red, haciendo que todas sus demandas se multipliquen por ese valor. De esta manera, si se quisiese simular un día de verano o un día de invierno, bastaría con aplicar un multiplicador mayor o menor a 1 a la red. Este variaría en función de la desviación de consumo de cada mes sobre la media, dato que se obtendría de los registros de consumo de agua de AMVISA [30]. Dentro de este escenario no se han querido abandonar los riegos como demandas, ya que afectarían en gran medida al funcionamiento de la red.

El proceso de actualización de la demanda consta de varias fases. La primera de ellas es la de actualizar los patrones de demanda de los nodos de Gardelegi, Albina y S-19. Después se han reducido las demandas en los nodos en base a los consumos medios. Por último, se ha añadido la demanda restante en las localidades incorporadas y zonas de expansión en la ciudad.

4.2.1 Actualización de patrones

En la actualización de patrones de demanda se han utilizado datos proporcionados internamente por el SCADA de AMVISA.

4.2.1.1 Albina

Para la actualización de la demanda de la zona de albina, se han cogido todos los datos históricos desde hace dos años. El caudal queda registrado a cada hora en punto gracias a un caudalímetro. Después se ha hecho la media de más de 700 lecturas para proporcionar ese valor a la curva de demanda. Finalmente se consigue el resultado obtenido en la Figura 20.

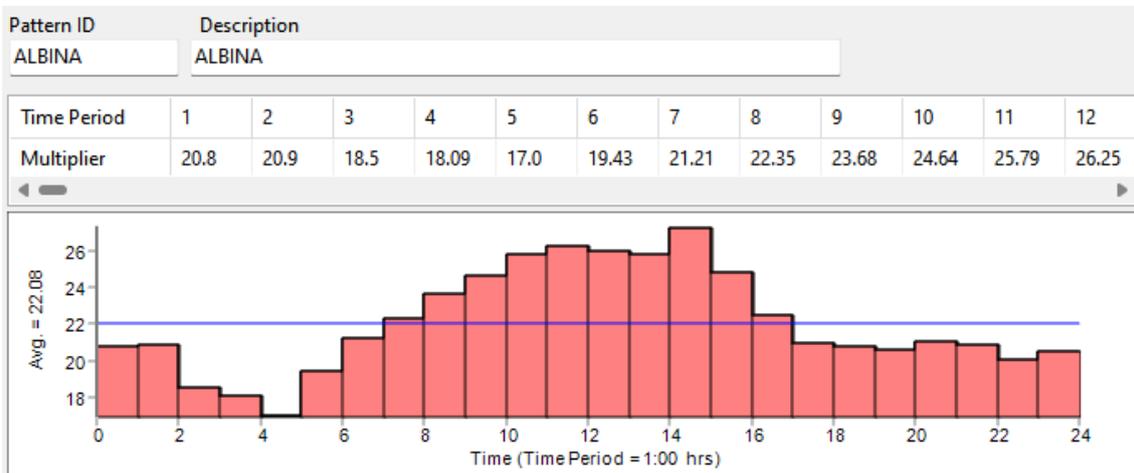


FIGURA 20. PATRÓN DE CONSUMO ZONA ALBINA.

4.2.1.2 Gardelegi y S-19

Para la actualización del depósito de Gardelegi se han utilizado los últimos datos registrados de los meses de marzo y abril de 2024. En los datos venía el registro del porcentaje del volumen ocupado que tenía el depósito a cada hora en punto. Conociendo las dimensiones del depósito, basta con calcular la diferencia de volumen entre horas para poder sacar el caudal en m^3/h , para después pasarlo a l/s . Como vemos en la Figura 21 el depósito se llena durante el horario nocturno, y de día pasa a suministrar agua a la red, que se representan como valores negativos. La media de consumo en el depósito es casi nula, ya que sirve como depósito regulador y no como un punto de consumo.

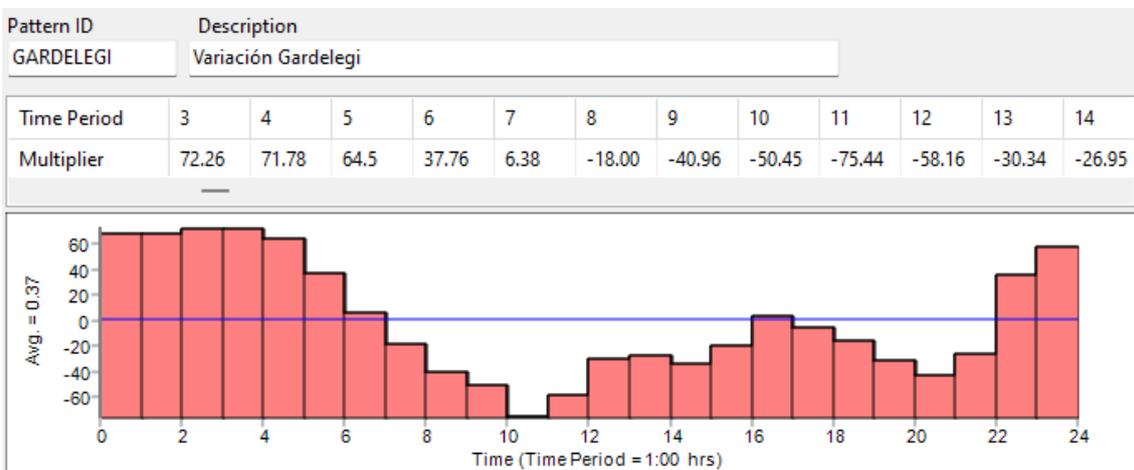


FIGURA 21. PATRÓN DE DEMANDA DEL DEPÓSITO DE GARDELEGI.

Desde la entrada del depósito de Gardelegi, un bombeo nocturno alimenta otro depósito situado a una cota de 620 metros, llamado S-19. Este depósito alimenta la red de Goikolarra y brinda presiones de más de 40 mca a los puntos de consumo gracias a la diferencia de alturas. En la Figura 37. Anexo IV se ven dónde están situados exactamente los depósitos de Gardelegi (centro del mapa) y S-19 (sur del mapa).

En la Figura 22 se puede ver el patrón de cómo se comporta el depósito S-19. Este recibe un bombeo continuo de aproximadamente 27 l/s durante tres horas, empezando a la una de la madrugada y terminando a las cuatro, para así aprovechar el precio más económico de la energía. El resto del día recibe un aporte de agua casi nulo.

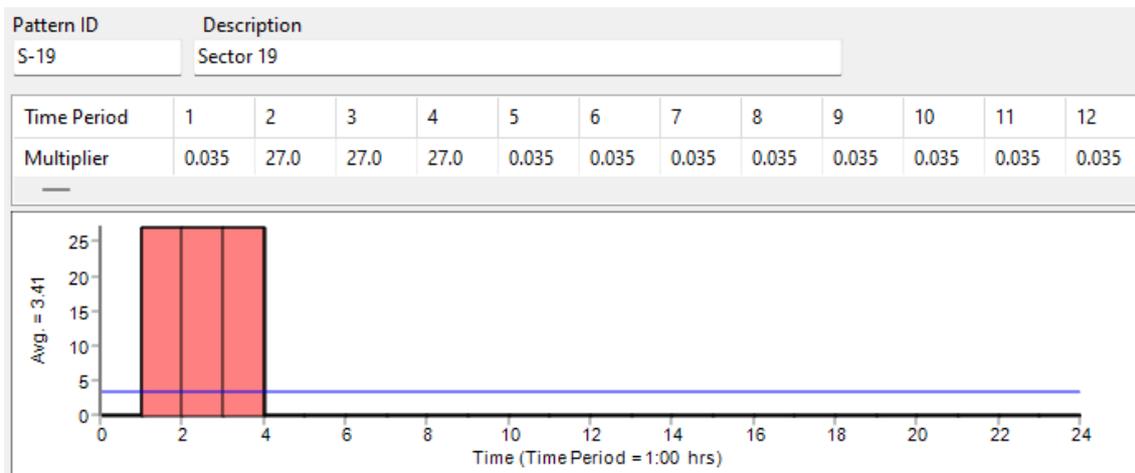


FIGURA 22. PATRÓN DE CONSUMO DEPÓSITO S-19.

4.2.2 Ajuste nodos

Para el ajuste del consumo de los nodos existentes al consumo actual, se ha aplicado un coeficiente de reducción, tanto a los nodos como a las “demands”. Para el cálculo de este coeficiente primero se ha obtenido el consumo diario contemplado en el modelo, que resulta en dividir el total de demanda entre la población estimada. Después se ha dividido el consumo diario por habitante de 2022 entre el consumo diario por habitante contemplado en el modelo. El coeficiente de 0,6904 es el resultado de esta división. Este coeficiente se ha aplicado a cada nodo, cambiando el valor que muestra en el modelo. No hay que confundir este coeficiente aplicado a cada nodo, con el multiplicador de demanda general. En la Tabla 7 se puede ver como el consumo total del modelo actualizado debería rondar los 600 l/s.

TABLA 7. COEFICIENTE APLICADO A NODOS

Año	Poblacion est.	l/hab día	Demanda tot.
2010	238000	292,6	805,90
2024	256000	202,0	598,52
Diferencia	18000	-90,6	-207,38
Coeficiente a aplicar		0,6904	

4.2.3 Localidades o pueblos dependientes de AMVISA

Desde 2010 varias son las localidades, o pueblos, que han pasado a depender de AMVISA para el abastecimiento de sus habitantes. La demanda de los pueblos que figuran en la Tabla 8 es la que se ha incluido en el modelo, y se ha obtenido multiplicando los habitantes por su consumo diario con un aumento del 20 %. Este aumento se ha introducido como factor de seguridad, por la variación del consumo en los pueblos de un año a otro. De todas formas, la demanda en las localidades no es muy elevada, por lo que no afecta en gran medida al MD.

Aunque para hacer llegar el agua hasta algunos de estas localidades como Lasarte o Aberasturi se precise de un bombeo, se ha decidido añadirlos para tener una demanda del MD más exacta. De esta manera se consigue que los caudales que circulan por las tuberías que llevan el agua a los pueblos sean más precisos. Al final de la Tabla 8 se mencionan las localidades que están dentro del caso de estudio como una única demanda. Gamiz y Bolivar comparten nodo de demanda, de ahí su agrupación en la tabla. En total, las localidades añadidas exigen un consumo de 2,4 l/s.

TABLA 8. DEMANDA DE PUEBLOS AÑADIDA AL MODELO.

Pueblo	Habitantes	l/día*hab	l/s
Arcaya	99	131	0,180
Aberasturi	129	123	0,220
Ullibarri-Arrozua	75	100	0,104
Lasarte	286	213	0,846
Gamiz	31	199	0,097
Bolivar	13	64	
Pueblos estudio de caso	368	179	0,898
Total pueblos	1052	147	2,346

4.2.4 Incorporación nuevas demandas

La población estimada en el MD de Vitoria-Gasteiz ha aumentado en torno a 18.000 habitantes. Aunque este aumento de habitantes no suponga un aumento general de la demanda de agua, sí que supone un aumento de puntos de demanda o nodos de consumo. Por ejemplo, el nodo del S-19 y los nuevos nodos de los pueblos son ejemplos de estos. Sin embargo, en Vitoria-Gasteiz han surgido nuevas edificaciones, a las cuales se les tiene que aplicar un nodo de consumo. Estas edificaciones se han dado principalmente en los barrios exteriores de Salburua, Zabalgana, Goikolarra y Adurtza. En el polígono industrial de Gojain también se han construido nuevos pabellones industriales los cuales requieren de agua potable.

4.2.4.1 Caso Salburua

En el caso de Salburua se ha hecho un estudio detallado de la demanda, ya que es el barrio que mayor expansión en cuanto a edificaciones ha tenido. En la Tabla 9 se observa un resumen del proceso de cálculo de demanda en el barrio de Salburua. Los datos se han obtenido principalmente del informe anual de consumo de agua de AMVISA del año 2022 [35]. Primero

se ha calculado la demanda actual total de los habitantes de Salburua en l/día, multiplicando el número de habitantes por su consumo. Después se le ha agregado el consumo de las tarifas 3, 4, 6 y 8, que equivalen a gastos de “Centros Oficiales”, “Comercio”, “Industria” y “Ayuntamiento”, respectivamente [35]. A cada barrio se le aplica un porcentaje en cada tarifa según el consumo que tengan en estas áreas. Para el barrio de Salburua estos consumos son muy reducidos, ya que es un barrio meramente residencial sin apenas industria o negocios.

Después, gracias a las herramientas de QGIS, se suman todos los nodos con demanda existentes en el barrio después de haber aplicado el coeficiente de reducción. Restando la demanda antigua a la actual, obtenemos que falta por aplicar aproximadamente un total de 14,5 l/s en el barrio de Salburua, habiéndole aplicado un factor de error del 5%. Esta demanda se ha aplicado mayoritariamente en las zonas donde se han construido nuevos edificios. En la Figura 38. Anexo V y Figura 39. Anexo V, se pueden ver las demandas de Salburua antes y después de la actualización.

TABLA 9. DEMANDA DE SALBURUA.

Demanda Salburua	
Habitantes Salburua	20591
Consumo medio hab (l/dia)	98,40
Consumo diario (l/dia)	2026154,40
Demanda (l/s)	23,45
Demanda Tarifas 3,4,6 y 8 (l/s)	0,60
Demanda Total	24,05
Demanda Nodos Salburua	9,32
Demanda faltante	14,73
Factor de error	0,05
Total Demanda a Agregar	15,47

4.2.5 Resumen demanda global de Vitoria Gasteiz

En la Tabla 10 se presenta un resumen general de la demanda actualizada del MD de la RDA de Vitoria-Gasteiz. Se distinguen por tipos de demanda la cantidad de l/s aplicada. Después de actualizar todas las demandas, añadir las demandas en las localidades y en el depósito S-19, se han añadido casi 35 l/s más al MD. En total la demanda del MD actual es de aproximadamente 600 l/s, un valor muy cercano al teórico consumo mostrado en la Tabla 7.

TABLA 10. RESUMEN DE DEMANDA.

Tipo Demanda	Nº	Media diaria	Total (l/s)
Demanda Garde	1,0	0,4	0,37
Demanda S-19	1,0	3,4	3,41
Demanda Albina	1,0	22,1	22,08
Demanda Nodos	471,7	1,0	471,68
Demands QDZx	16,2	1,0	16,18
Demands Riego	149,0	0,3	49,16
Demanda Pueblos	2,3	1,0	2,35
Demanda Nueva	34,9	1,0	34,86
Total Demanda			600,07

5 Análisis RDA actualizada y comparación

En esta sección, en primer lugar, se analiza la demanda de caudal total del MD actualizado. Después se analizan detalladamente las presiones y pérdidas de carga del MD y se comparan con el MD inicial. Por último, se realizan unas valoraciones sobre las velocidades en la red.

5.1 Demanda de caudal total

La demanda de agua en una ciudad varía en función del momento del día que sea. En la Figura 23 se presenta la variación del consumo de agua de la RDA de Vitoria-Gasteiz a lo largo de un día, así como el aporte que hace la ETAP de Araka y el embalse del Gorbea. La demanda total positiva requerida por los nodos se muestra con una línea roja. El aporte de agua nueva que entra en el sistema de la RDA está representado por la línea verde. Por último, la línea azul muestra el caudal que sale del reservorio de Araka.

La diferencia pequeña entre la línea azul y la línea verde representa el aporte de agua que llega desde el embalse del Gorbea. Si se compara la línea verde con la línea roja, es apreciable que en algunos momentos del día es prácticamente igual, mientras que en las horas centrales del día hay una diferencia notable. Esta es causada por la regulación del depósito de Gardelegi. En los intervalos horarios que el depósito de Gardelegi aumenta su volumen de agua embalsada, es el reservorio de Araka principalmente el que se encarga de suministrar esa agua, haciendo que la demanda y el aporte de agua se igualen. En cambio, en los tramos en los cuales el depósito de Gardelegi suministra agua a la red, éste sirve como aporte para cubrir la demanda, por lo tanto, el reservorio de Araka, junto con el aporte del Gorbea, no necesita cubrir la demanda total. La diferencia generada entre la línea verde y la línea roja es exactamente ese aporte de agua que hace el depósito de Gardelegi.

En general, se pueden distinguir tres etapas en la demanda, con diferentes niveles de caudales con una duración aproximada de ocho horas cada una. Entre las seis de la mañana y las dos del mediodía se distingue la fase horaria con los caudales más elevados. Esto se debe a una mayor actividad de la población tanto en las viviendas como en la industria y los comercios. Entre las dos del mediodía y las diez de la noche existe una fase con una demanda inferior a la media, que, si se recuerda, era aproximadamente 600 l/s. Por último, se encuentra la fase nocturna, entre las diez de la noche y seis de la mañana, con una demanda media. Aunque parezca contradictorio este aumento de demanda en el periodo nocturno tiene varios motivos. En este tramo horario se activa el riego y el bombeo al depósito S-19, así como la fase de llenado del depósito de Gardelegi. Esto hace que la demanda de caudal incremente en más de 150 l/s en este periodo, respecto al anterior.

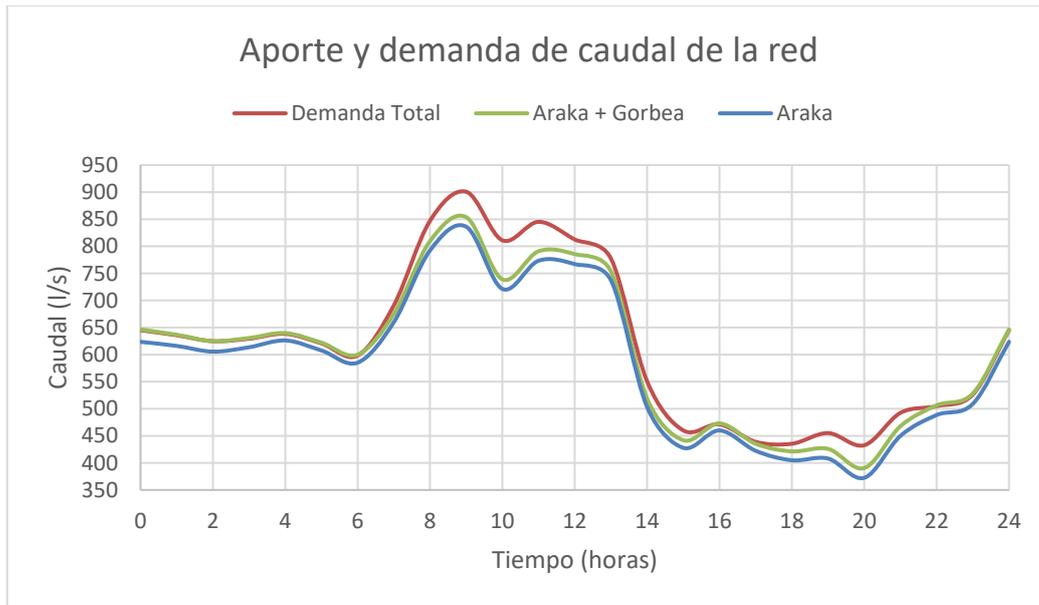


FIGURA 23. VARIACIÓN DEL APOORTE Y DEMANDA DE CAUDALES A LO LARGO DEL DÍA.

En los análisis a continuación se tomará como referencia la franja horaria de las nueve de la mañana, ya que es la que mayor demanda de caudal registra.

5.2 Presiones

La presión es el factor más importante a la hora de analizar una RDA. Esta determina si el suministro de agua es posible o no, ya que una presión negativa en un punto significa que el agua no tiene la energía suficiente como para llegar a ese punto y una presión excesiva podría suponer un problema para la integridad de la red.

En el diseño de las RDAs se establecen criterios en cuanto a las Presiones Máximas Admisibles (PMA) y Presiones Máximas de Diseño (MDP) que puede soportar la red. La primera es la presión máxima que soportan las tuberías y la segunda es la presión máxima obtenida en el diseño de la red. Como es lógico, la PMA siempre tiene que ser superior a la MDP. Por ejemplo, en la comunidad de Madrid la empresa pública Canal de Isabel II establece que la PMA de las tuberías de PE debe ser superior a 1,6 MPa, o lo que es lo mismo, 163 mca. En las tuberías de FD, la PMA asciende a 367 mca [37]. En la RDA de Vitoria-Gasteiz, la MDP que obtenemos del modelo es de 83,65 mca, por lo tanto, este criterio estaría sobradamente superado.

Sin embargo, una presión excesivamente alta, aunque cumpla la normativa, puede acarrear numerosos problemas como aparición de fugas o roturas en tuberías antiguas. Por eso, el control de la presión es esencial para evitar presiones demasiado elevadas. Varios documentos establecen unas presiones mínimas y máximas recomendables en el diseño de las RDA para un funcionamiento correcto, que rondan en torno a los 15 mca como mínimo y 70 mca como máximo [27][38]. En el análisis tomaremos como referencia estas dos presiones.

En la Figura 24 se muestra el mapa de la RDA de Vitoria-Gasteiz mostrando las presiones en los nodos a las nueve de la mañana. A simple vista vemos como a medida que el agua viaja hacia el

sur, las presiones disminuyen. La mayor parte de los nodos sostienen presiones en un rango óptimo entre los 35 y 70 mca. Una pequeña parte de los nodos, en concreto 559, tienen presiones entre los 15 y 35 mca, presiones bajas pero suficientes para garantizar el abastecimiento. En estos casos, si el edificio a abastecer es muy alto, se tendrá que instalar un grupo de presión en el edificio para hacer llegar el agua hasta las plantas más elevadas. Cabe destacar que la mayoría de los nodos verdes (ver Figura 24) se encuentran en el barrio de Mendizorrotza, más concretamente en la zona conocida como Armentia, donde la mayoría de las edificaciones no constan de más de tres pisos.

En cuanto a los nodos que sobrepasan la presión máxima recomendada son 4.857, casi una cuarta parte del total de los nodos modelados en el MD. Este número ha aumentado respecto al MD inicial en casi 1.000 nodos, ya que en el MD inicial eran 3912 los nodos que sobrepasaban el límite. Sin embargo, no es tan alarmante ya que el valor máximo registrado en el modelo es de 83,65 mca, el cual está lejos de llegar a las PMA de las tuberías. Se puede afirmar que en una cuarta parte de la red hay una ligera sobrepresión. Esto produce que el daño y desgaste de los materiales sea mayor en el tiempo prolongado, así como aumentar la probabilidad de pequeñas fugas.

Por último, existen 62 nodos que están por debajo del nivel mínimo recomendable. La mayoría de estos nodos se encuentran en la ETAP de Araka y no representan nodos de consumo, sino de modelización. Los nodos que preocupan son los situados en la zona sur de Vitoria-Gasteiz, como se pueden ver en la Figura 40. Anexo VI. Cuatro de ellos se encuentran en la tubería que alimenta el depósito de Gardelegi, los cuales no tienen demanda, y otros dos pertenecen a los depósitos de Gardelegi y S-19. Respecto al depósito del S-19, la presión no muestra un valor real, ya que solo sirve para simular su consumo. Como ya se ha explicado en el apartado 4.2.1.2, este recibe un bombeo nocturno que brinda presión a el agua para que llegue a la cota de 620 metros. Antes de que el agua entre al depósito de Gardelegi, el MD registra siempre presiones superiores a los 10 mca, suficientes para abastecerlo.

El nodo con presiones ínfimas situado más a la izquierda carece de importancia ya que en esa tubería no existe demanda alguna. Los últimos nodos con presiones menores a 15 mca son los situados más al sur, detrás de la ikastola Olabide. Las presiones registradas en estos nodos son las más bajas de la red, pero siempre mayores a los 9 mca. Además, en esta localización se encuentra un pequeño depósito y un bombeo, que juntos regulan y aumentan la presión del agua para llevarla a los pueblos situados más al sur. En el momento de mayor demanda de agua, el último nodo ubicado en esta zona muestra un valor de 10,12 mca, mientras que, en el modelo anterior, su valor era de 9,16 mca. Se ha conseguido elevar la presión en el punto más crítico 1 mca. El único nodo con presiones negativas corresponde a un pequeño depósito situado al oeste, que es abastecido mediante una bomba, por lo que la presión que muestra no es la real.

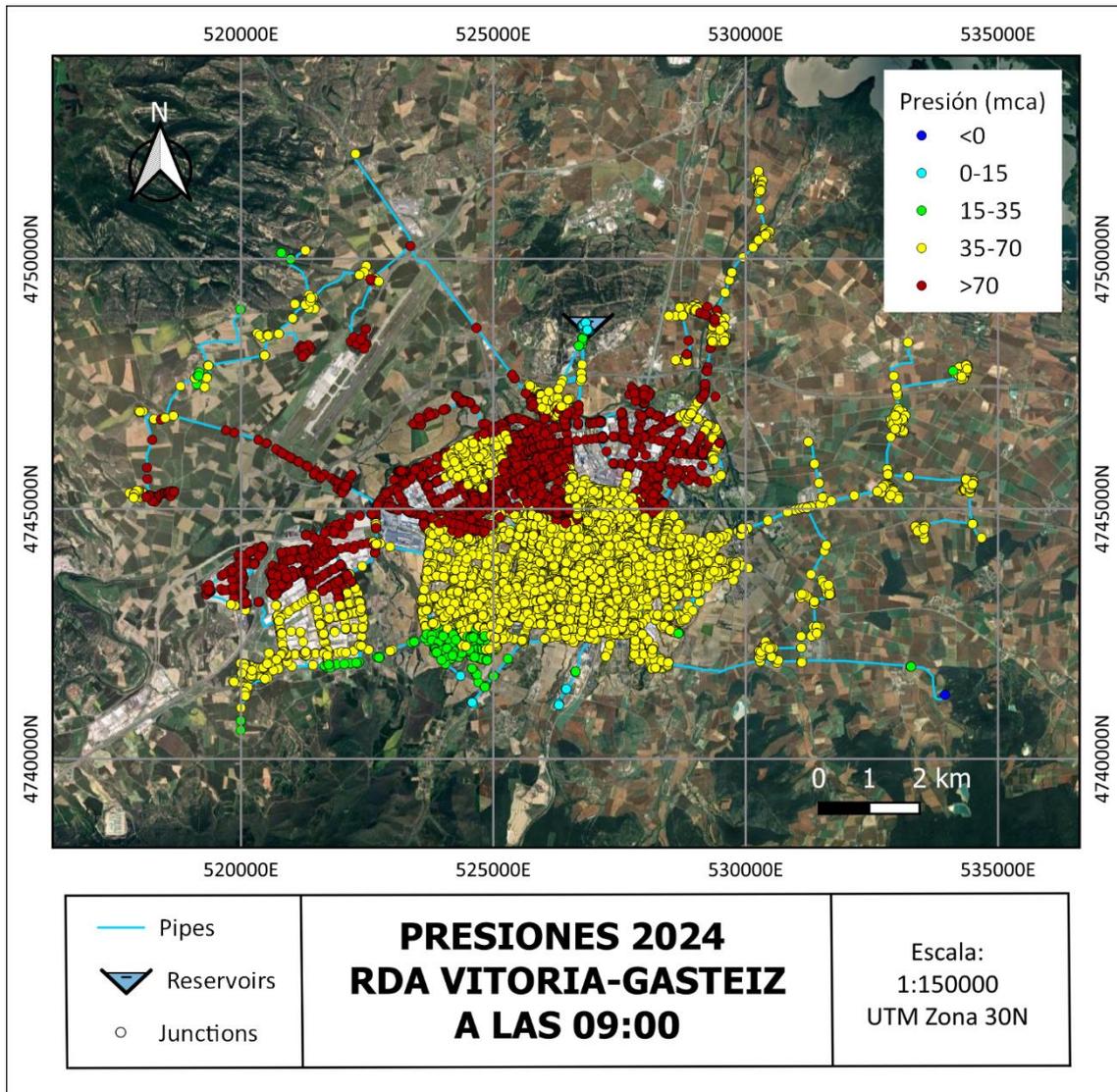


FIGURA 24. PRESIONES EN LOS NODOS RDA DE VITORIA-GASTEIZ 2024.

Al comparar las presiones obtenidas en la RDA de 2024 con la de 2010, la cual se muestra en la Figura 41. Anexo VI, no se observan apenas diferencias a simple vista. La presión media en la red ha subido de 60,5 mca a 61,4 mca. Esto se debe a la reducción en la demanda de los nodos, y, por tanto, reducción en las pérdidas acumuladas. Al tener más presión, se ha conseguido que algún nodo más entre al rango 15 - 35 mca, pero, por otro lado, el daño que pueda ejercer la presión a la red será mayor. Definitivamente, se prioriza dotar de agua en unas condiciones aceptables a toda la población de Vitoria-Gasteiz antes que no subir ligeramente la presión de la red, por lo que se puede decir que el incremento de presiones es positivo.

5.3 Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga son otro factor por controlar en las RDA. Unas pérdidas de carga elevadas pueden hacer que la presión en la red descienda tanto que el suministro de agua potable se dificulte y no permita abastecer con garantías a la población. La principal manera de estudiar de una manera general las pérdidas de carga es a través de la altura total en los nodos. De una

forma más detallada, la pérdida de carga unitaria revela cuánto es la pérdida por unidad de longitud de cada tubería, la cual se analiza en el segundo subapartado.

5.3.1 Altura total

La altura total de un fluido en un nodo representa la energía interna que una unidad de masa tiene dentro de la red. Como se ha explicado en la ecuación (3), la resta de alturas entre dos puntos de la red dará como resultado la pérdida de carga sufrida entre los puntos. En la Figura 25 se muestran cuatro curvas que representan las pérdidas de carga entre el nodo con mayor altura y menor altura, así como las pérdidas entre el depósito de Araka y el nodo con menor altura, en ambos modelos a lo largo de un día.

El nodo con altura mínima varía en función de la hora del día, mientras que el nodo de máxima altura en ambos modelos corresponde con el nodo que simula el aporte de agua del embalse del Gorbea. Es decir, la energía que trae el agua proveniente de ese nodo es mayor a la suministrada desde depósito de Araka. La mayor pérdida de carga de la red de 2010 registrada entre el nodo del Gorbea y el nodo con menor altura, es de casi 7 mca, y se da justamente cuando el aporte del Gorbea registra el valor más elevado. En la red actualizada, esta pérdida de carga, a la misma hora, se reduce más de la mitad alcanzando el valor de 3,2 metros. Ahora la mayor diferencia la encontramos a las 9 de la mañana, justamente cuando la demanda de agua es mayor.

Sin embargo, el caudal que aporta el nodo de Gorbea es ínfimo comparado con el caudal del reservorio, por lo que solo aporta altura a unos pocos nodos situados en la zona norte. Por lo tanto, la máxima pérdida de carga entre el reservorio de Araka y un nodo es más representativa para medir las pérdidas de carga en la red general (Araka-Min) que la diferencia mencionada en el anterior párrafo (Max-Min). Así se puede conocer la máxima pérdida de carga que sufre una unidad de masa de agua desde que sale del reservorio de Araka hasta que llega al nodo con menor altura. O lo que es lo mismo, la presión que pierde por el camino.

Tal y como se aprecia en la curva Araka-Min 2010 (morada) y Araka-Min 2024 (verde), la mayor pérdida de carga en la RDA sucede a las nueve de la mañana, momento de mayor demanda. En el modelo anterior, esta pérdida de carga llega a valores de hasta 5,11 metros, mientras que en el modelo actual supera ligeramente los 3 metros. Esto se traduce en una reducción de un 40 % en la mayor pérdida de carga entre el reservorio de Araka y el nodo que registra la menor altura. Si se presta atención, la curva verde sigue una curva muy parecida a las curvas mostradas en la Figura 23, ya que las pérdidas de carga están directamente relacionadas con la velocidad y a su vez con el caudal de agua demandada.

Puede parecer que, al haber introducido tuberías con mayores coeficientes de rugosidad y pérdidas de carga en las válvulas, el resultado pudiera ser erróneo. Si se observan las ecuaciones (7) y (9), el caudal en la primera, y la velocidad en la segunda, se multiplican de forma exponencial. Estos parámetros suelen tener valores menores a 1, por lo que una reducción de demanda de caudal, y por lo tanto también de velocidad, genera una reducción al cuadrado

sobre la pérdida de carga. Entonces, una vez actualizada la demanda, el efecto que tiene la reducción de demanda de caudal es mayor al efecto de los coeficientes de rugosidad. Por lo tanto, las pérdidas de carga en la RDA de Vitoria-Gasteiz se ven positivamente reducidas de un modelo a otro.

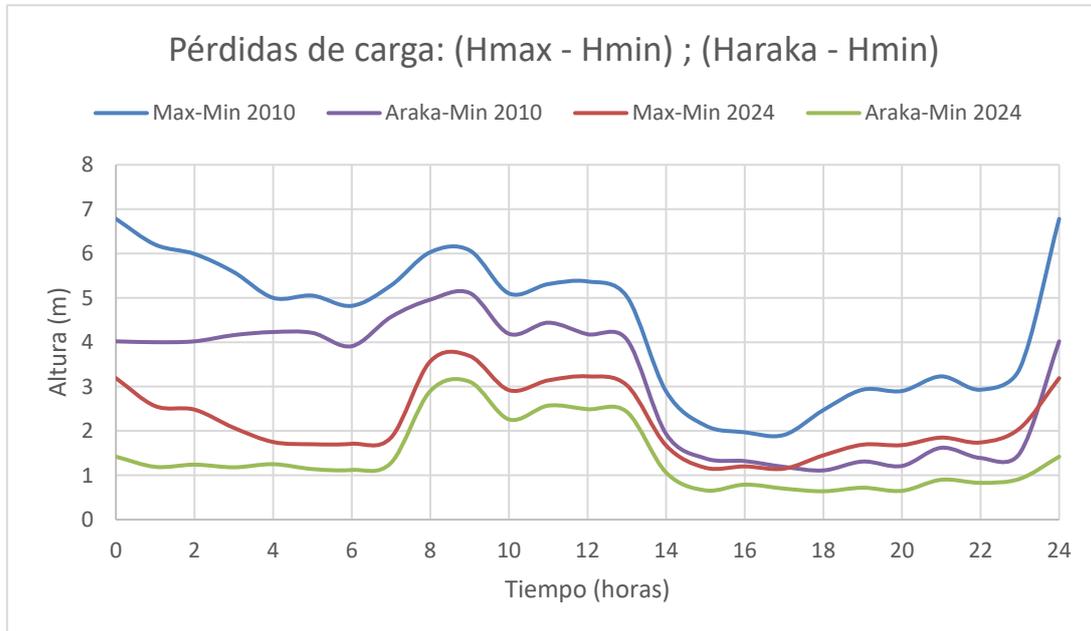


FIGURA 25. PERDIDAS DE CARGA MÁXIMAS.

Si se suma el total de pérdida de carga que sufre la red a las nueve de la mañana, se obtiene un valor de 84,5 mca para el modelo anterior, y 47,6 mca en el modelo actualizado. Esto quiere decir que las pérdidas de carga totales de la red se han reducido aproximadamente un 44 % a la hora de mayor demanda, obteniendo como resultado presiones más elevadas sobre todo en los tramos más alejados de la red.

5.3.2 Pérdidas de carga unitaria

El análisis detallado de las pérdidas de carga es crucial en el diseño de redes de distribución. Mora recoge en su tesis numerosos autores que establecen técnicas de diseño de diámetros de las tuberías en base a las pérdidas de carga. Por ejemplo, si tras diseñar una red las presiones mínimas no se cumplen, hay quienes establecen un método para aumentar los diámetros en las tuberías con mayores pérdidas, hasta que se cumplan las presiones mínimas. Otros, directamente establecen un máximo valor para la pérdida de carga unitaria [39]. Esta pérdida de carga representa la altura perdida por km de red. Aunque en este TFG no se diseña la red, se ve conveniente analizar este parámetro para encontrar aquellas tuberías donde se producen mayores pérdidas.

En la Figura 42. Anexo VI y Figura 43. Anexo VI se muestran las tuberías que sufren una pérdida de carga mayor a 0,1 metros. Comparando la red actual con el anterior MD, es fácilmente apreciable que la cantidad de tramos rojos, amarillos y verdes se han reducido considerablemente, es decir, los tramos que superan dicha cantidad de pérdida se han reducido.

Al reducir el caudal, se reducen las velocidades, y con ello las pérdidas de carga. En cuanto a las tuberías de longitud elevada, es normal que contemplen valores altos de pérdida debido a su larga longitud, por lo que no resultan problemáticas. En cambio, las tuberías con longitud corta y pérdida elevada, como son los tramos amarillos de las figuras mencionadas, si son objeto de análisis. Esto nos lleva a analizar la pérdida de carga unitaria.

En la Figura 26 se ha querido mostrar los 3 tramos con mayor pérdida de carga unitaria de la red. La pérdida de carga unitaria que muestran estas tres tuberías a las nueve de la mañana es mayor a 80 m/km, llegando a los 125 m/km. Estos valores son muy elevados comparados con el resto de la red ya que como máximo se registran valores de 5 m/km, exceptuando una tubería que registra valores mayores que 5 m/km pero por debajo de 15 m/km.

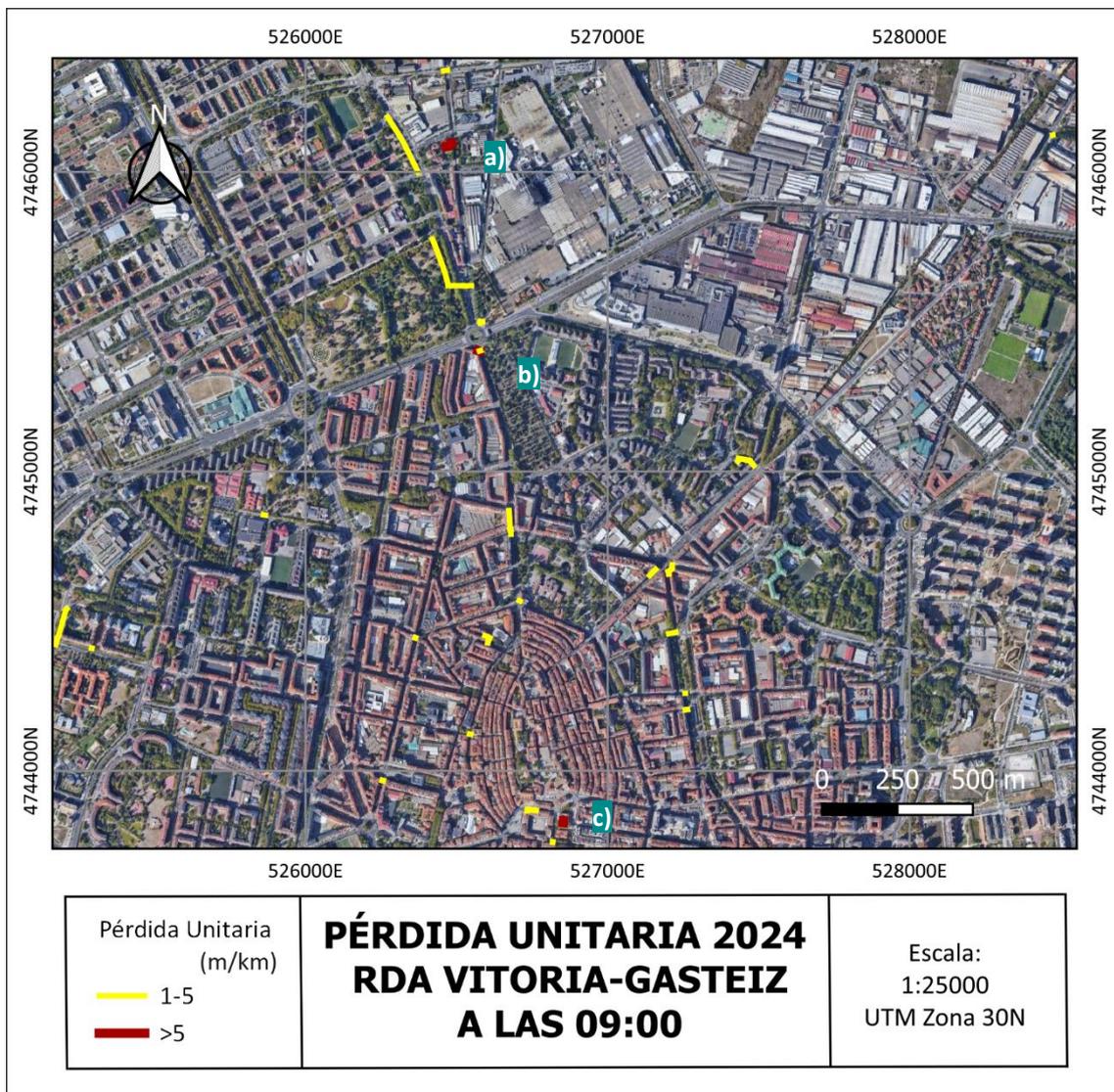


FIGURA 26. PÉRDIDAS DE CARGA UNITARIA MÁS ELEVADAS ACTUALES.

Como bien se ha explicado, la velocidad del agua está directamente relacionada con la pérdida de carga. Justamente, las tres tuberías con mayor velocidad en la red son las tuberías destacadas en la figura anterior, a), b) y c), y registran valores de 1,6, 3,29 y 1,08 m/s respectivamente. El

fluido, al pasar de una tubería con sección mayor a otra de diámetro menor, siempre que mantenga el caudal, aumenta de velocidad. En los tres tramos mencionados sus diámetros nominales son muy inferiores a los que los preceden, propiciando un gran salto de velocidad de una tubería a otra. Por lo tanto, es esta la razón principal por la que esos tres tramos de red muestran valores tan elevados en las pérdidas de carga.

Si se quisiera reducir la velocidad, y, por consiguiente, las pérdidas de carga en esos tramos, bastaría con aumentar el diámetro de las tuberías. Los tramos a) y c) son tuberías de 22 y 7,5 metros respectivamente, que sirven para transportar agua a un nodo final a través de una tubería de PE con diámetros tres veces menores que la tubería precedente. La pérdida de carga solo afecta a la presión del nodo final, ya que ese tramo de la red finaliza en ese nodo, y como en ambos casos la presión del nodo es superior a los 50 m, no sería necesario el aumento de diámetro.

En cambio, la tubería b) tiene una longitud de tres metros y un diámetro de 100 mm, y su función no es la de abastecer un nodo final. La tubería está conectada a dos tuberías de 400 mm de diámetro tanto en la entrada como en la salida, y a causa de este cambio de diámetros la velocidad aumenta a más de 3 m/s. Por lo tanto, para reducir esta velocidad y pérdida de carga, se ha decidido incrementar su diámetro a 400 mm. De esta manera, se ha conseguido reducir su velocidad hasta los 0,5 m/s.

En realidad, tras una comprobación del trazado físico, esta tubería resulta ser de 400 mm. En el MD antiguo fue modelizada con un diámetro de 100 mm por error y al no constar como tramo renovado, no fue modificado. Tras realizar este análisis detallado en cuanto a pérdidas de carga, este error ha sido descubierto y modificado a el valor real, que es 400 mm de diámetro. Es por ello por lo que se ha decidido incluirlo en el análisis de pérdidas de carga, ya que sirve como un claro ejemplo para lo que sirve analizar las pérdidas de carga en la red.

5.4 Velocidades

La velocidad es un parámetro más a controlar en el diseño de RDAs. Las velocidades altas provocan problemas de erosión y aumentan la posibilidad de producirse golpes de ariete, fenómeno que produce un aumento de presión en el interior de tuberías tras un cierre de válvulas, que puede hacer estallar una tubería. En cambio, una velocidad demasiado baja, puede producir estancamiento en tuberías provocando problemas de depósito en las paredes y otros de tipo sanitario [39].

La empresa madrileña Canal de Isabel II encargada del abastecimiento de agua en esa ciudad, establece un criterio de velocidades máximas seguras en el diseño de la red, diferenciando en tres tramos según el diámetro nominal: 1,5 m/s para los diámetros menores de 300 mm, 2 m/s para los diámetros entre 300 y 800 mm, y hasta 2,5 m/s para los diámetros mayores a 800 mm [37]. Estas velocidades son las máximas recomendables, en cambio, las máximas soportadas por el material o las válvulas son superiores, pero como es obvio, no se recomienda llegar hasta tal

punto. En cuanto a las velocidades mínimas, no se establece un mínimo, sin embargo, se ha escogido un valor mínimo seguro de 0,3 m/s [40].

En general, la velocidad del MD de la red de Vitoria-Gasteiz es muy baja. La velocidad media de la red actual es de aproximadamente 0,08 m/s, mientras que en el modelo de 2010 era de 0,12 m/s. Aunque el valor mínimo de velocidad no es un requisito para el funcionamiento hidráulico, es recomendable cumplirlo para evitar principalmente problemas de calidad del agua. En la red, solo existen aproximadamente 500 tuberías que sobrepasen la velocidad de 0,3 m/s. Por lo tanto, se puede decir que la red de Vitoria-Gasteiz está sobredimensionada. Esto quiere decir que los diámetros de las tuberías son elevados, y pueden soportar mayores caudales, que harían que la velocidad de las tuberías se sitúe en un rango más recomendable.

En cuanto a las velocidades máximas, como ya se ha mencionado en el anterior apartado, hay dos tuberías de PE que arrojan los valores más elevados, 1,08 y 1,6 m/s. Según los requisitos de la empresa Canal de Isabel II, que a su vez cumple con la norma estatal, la velocidad registrada en la segunda tubería se situaría justo por encima del valor máximo aceptable para ese diámetro ($1,6 > 1,5$ m/s). Por lo tanto, habría que aumentar su diámetro a uno superior, pero manteniendo la velocidad mayor a 0,3 m/s, para que cumpliera con los valores recomendados.

Este cambio de diámetro se mantendrá para el análisis de estrés de la red en el siguiente apartado. También se aumentará el diámetro de la tubería con 1,08 m/s de velocidad, ya que es la otra tubería que arrojaba un valor muy alto en cuanto a pérdidas de carga.

6 Casos prácticos red actual

6.1 Zona de Abastecimiento de Mandojana

La zona de abastecimiento de Mandojana, que comprende las localidades de Artaza de Foronda, Mandojana, Legarda y Guereña, es una zona de abastecimiento externa a la red de Vitoria-Gasteiz. Cuenta con su propio sondeo para la captación de agua y una estación de cloración situados en una cota superior a las viviendas para brindar presión y abastecer a los habitantes de los cuatro pueblos nombrados. Esta situación puede tener sus ventajas en la gestión del agua, pero cualquier imprevisto en la estación o la red puede dejar sin agua a estas cuatro localidades por un tiempo. Esta red se puede distinguir en la Figura 9, situada al noroeste de Vitoria-Gasteiz y encuadrada en un rectángulo rojo.

En marzo de 2024 se detectó una concentración excesiva de nitratos que imposibilitaban el consumo de agua potable por parte de la población, ya que no cumplía con los requerimientos en cuanto a calidad [41]. Desde AMVISA se pensó que la solución pasaba por conectar la pequeña red de Mandojana a la RDA de Vitoria-Gasteiz. De esta manera, el abastecimiento de estas poblaciones correría a cargo de la ETAP de Araka, y no de la estación de Mandojana. Con esta incorporación, la seguridad en la calidad del agua es prácticamente total, ya que debido a la importancia crítica de la ETAP de Araka en la vida de los vitorianos es muy improbable que surjan imprevistos en la red.

El primer paso para la incorporación de Mandojana a la RDA de Vitoria-Gasteiz es comprobar la influencia que esta tendrá en la red global. Para ello se modelizan las tuberías y válvulas de la red necesarias. Se han utilizado los trazados reales de la red de Mandojana y se han modelizado dentro del MD de Vitoria-Gasteiz. Los trazados de la red de Mandojana que no estaban contemplados en el MD de Vitoria-Gasteiz también se han incluido en el modelo. Después, las dos redes se han unido mediante tuberías de 150 mm de diámetro, de modo que se crea una maya que cierra la red en por los dos lados. La creación de la maya es fundamental a la hora de garantizar el abastecimiento continuo, ya que permite que los pueblos se puedan abastecer desde dos tramos diferentes.

Una vez finalizada la modelización del trazado de la red, hay que introducir la demanda de consumo de agua en los nodos. El consumo y la población de cada localidad se ha obtenido gracias a los datos que refleja el informe de consumo de agua de 2022 [35]. Con ello se ha calculado la demanda total que se incorpora en cada localidad multiplicando el consumo por los habitantes y añadiéndoles un 20%, la cual se puede ver en la Tabla 11. Esta demanda se ha repartido de manera equitativa entre los nodos finales que tiene la red en cada localidad, de tal manera que el agua fluya por toda la red.

TABLA 11. DEMANDA DE PUEBLOS AÑADIDA AL MD.

Pueblo	Habitantes	l/día*hab	l/s
Aranguiz	106	125	0,184
Guereña	58	151	0,122
Mandojana	17	266	0,063
Legarda	42	190	0,111
Artaza de Foronda	6	148	0,012
Antezana	94	164	0,214
Foronda	45	212	0,133
Mendiguren	27	160	0,060
Total pueblos	395	177	0,898

Una vez la modelización de la red incorporada al modelo está finalizada, se realiza un análisis en cuanto a presiones para comprobar que el abastecimiento es viable. Este análisis, al igual que el análisis anterior, se ha realizado a las nueve de la mañana, momento del día con mayores consumos. En la Figura 27 se muestra el trazado completo de la malla creada, así como las presiones obtenidas en los nodos. Si se compara con la Figura 41. Anexo VI, el nodo Gorbea se ha desplazado hacia el norte y principalmente, es por ahí donde se suministra el agua a esta zona.

Examinando las presiones, exceptuando unos pocos nodos, la gran mayoría registran valores mayores a 35 metros, por lo que la presión esta más que asegurada. Hay unos pocos nodos elevados que tienen valores de presión bajos pero aceptables, ya que todos superan los 20 mca de presión. Esto significa que el abastecimiento por gravedad es totalmente viable, sin necesidad de bombas hidráulicas que añadiesen presión a la red y repercutiesen costes energéticos.

En el análisis las pérdidas de carga, mostradas en la Figura 42. Anexo VI, destacan en el nuevo trazado cuatro tuberías con pérdidas de carga mayores a 0,1 mca. Tres de ellas, las de color verde, registran una pérdida de carga elevada debido principalmente a su extensa longitud. Sin embargo, la tubería que mayores pérdidas repercute, destacada en amarillo, es una tubería de PE de 61,4 mm de diámetro con una extensión reducida. En momentos del día el agua pierda casi hasta un metro de presión dentro de la tubería. Al igual que sucedía en las tuberías analizadas en el anterior apartado, la tubería contigua tiene un diámetro casi tres veces superior, 150 mm, siendo una de las nuevas tuberías que conectaría las dos redes. Aunque las presiones son lo suficientemente aceptables, si a la hora de realizar las obras se sustituyese esta tubería existente de PE por una de 150 mm se evitaría esta pérdida de carga.

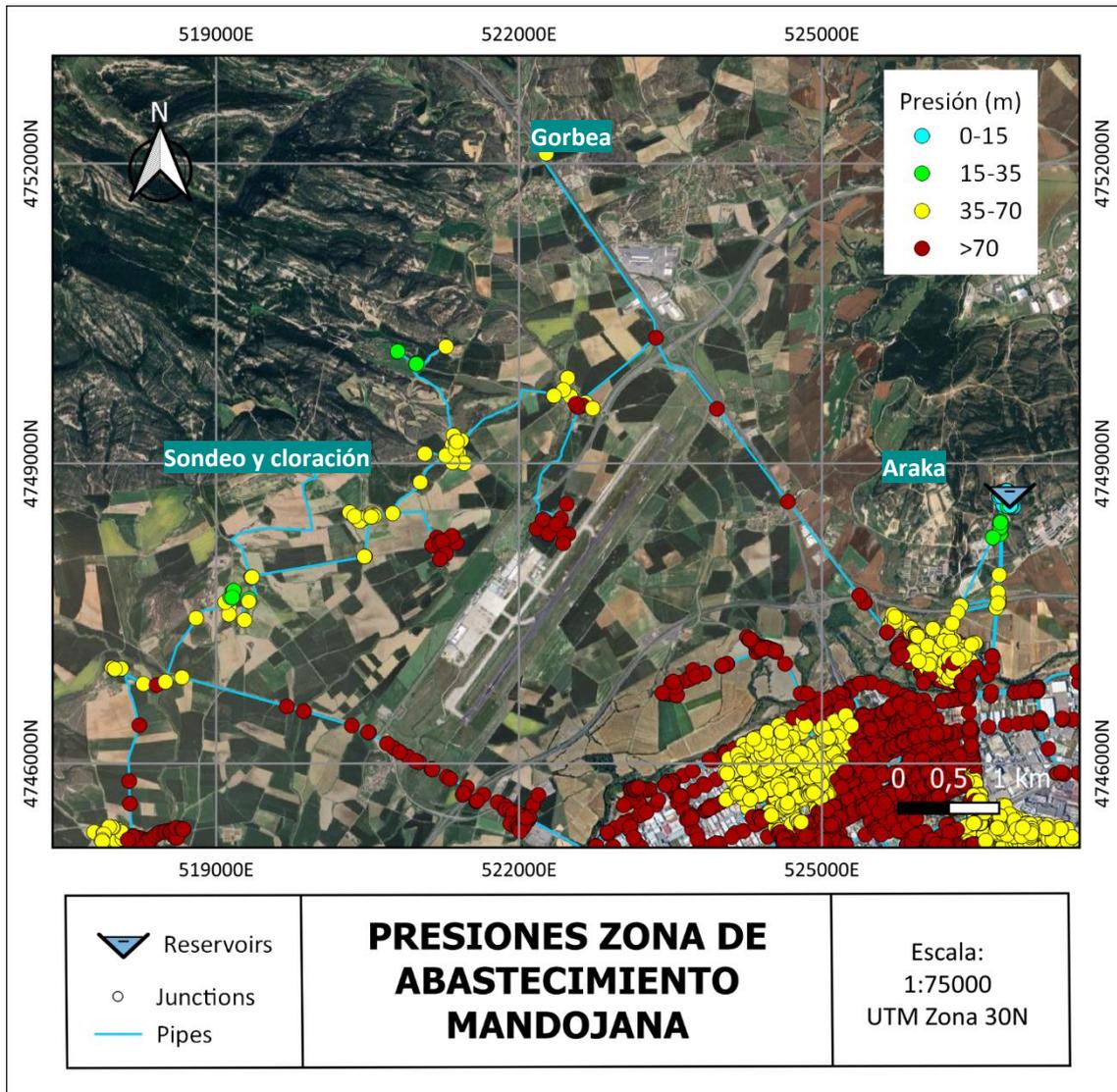


FIGURA 27. PRESIONES EN LA ZONA DE ABASTECIMIENTO AÑADIDA.

6.2 Análisis de estrés de la red de Vitoria Gasteiz

Como se ha demostrado en el análisis de velocidades, la RDA de Vitoria-Gasteiz está mayoritariamente sobredimensionada. Esto quiere decir que tiene capacidad para soportar más caudal del que actualmente transporta. En este apartado se va a realizar un análisis de estrés de la red, aumentando progresivamente el caudal y viendo cómo se comporta en cuanto a presión y velocidad. Como se ha explicado previamente, QGISRed permite aplicar un multiplicador de demanda a la red, por lo tanto, si se quiere simular un aumento de población del 50 % bastaría con introducir 1,5 como valor de multiplicador de demanda. En este análisis, se presupone que la demanda media de agua por habitante se mantiene constante respecto a la del año 2022, así un aumento de la demanda total de la red equivale en la misma proporción a un aumento de población.

Como límite de presión se va a establecer la presión negativa, es decir, cuando sea imposible que el agua llegue hasta el nodo de consumo. En ese momento el programa nos avisa de que la red no puede abastecer toda la demanda, por lo que la red fallaría al realizar su función.

Tras realizar los análisis con diferentes aumentos de población se han obtenido las curvas que se muestran en la Figura 28. La curva de presión mínima (azul) muestra la presión obtenida en el punto con menor presión de la red, el cual se sitúa al lado de la ikastola Olabide. En este punto hay un bombeo hacia las localidades de Berosteguieta y Eskibel. Es necesario asegurar que el agua llega a este punto, para que luego pueda ser impulsada por la bomba. Como es lógico, a mayor demanda, menores presiones se obtendrán en los extremos de la red, por eso la curva es descendente.

La curva roja representa la velocidad máxima obtenida en la red, habiendo realizado los tres cambios de sección comentados previamente. Esta se da siempre en la tubería de HCC de 600 mm de diámetro y con una longitud de 13,5 metros situada en la zona donde las dos tuberías de alimentación se conectan con el anillo principal. Esta tubería conecta la red primaria con la red secundaria. En resumen, es una tubería por la que pasa un caudal muy elevado a velocidades altas. A mayores demandas, se observa claramente como la velocidad aumenta de forma proporcional al consumo de agua.

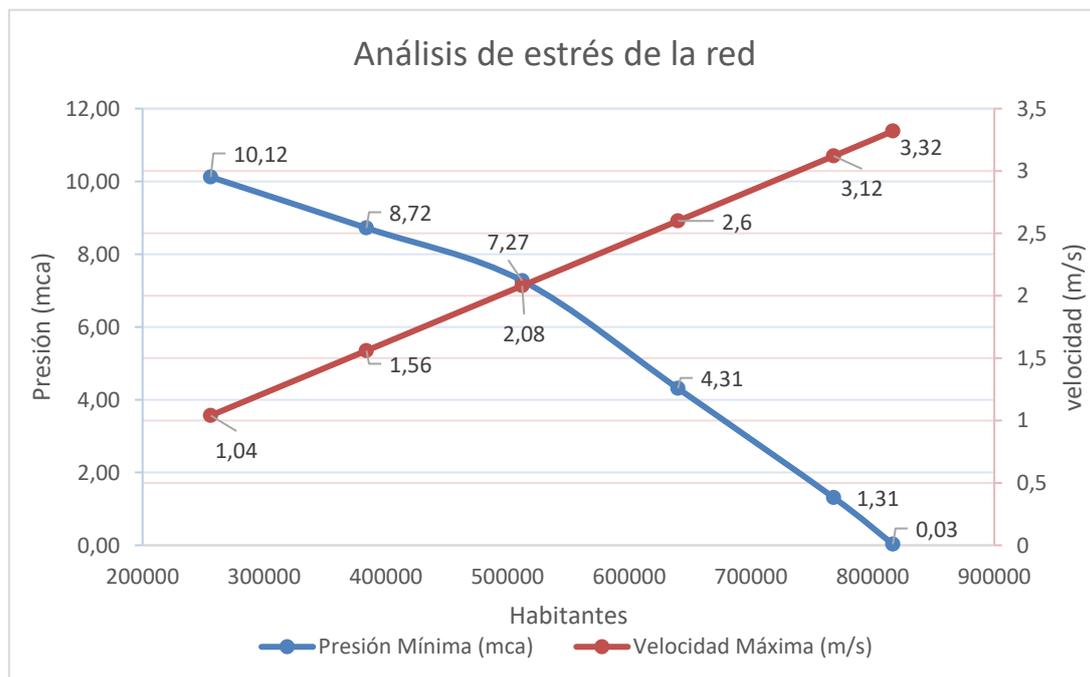


FIGURA 28. ANÁLISIS DE ESTRÉS DE LA RDA DE VITORIA-GASTEIZ.

Si Vitoria-Gasteiz aumentase su población un 100 % y pasase a tener un total de 512.000 habitantes, manteniendo el consumo medio por habitante actual, la red actual sería totalmente válida para abastecer a toda la población. Con un aumento del 150 %, y una población de 640.000 habitantes, la presión en el nodo de Olabide reduce de manera clara su presión hasta un valor crítico de 4.31 mca. La velocidad máxima supera ligeramente la velocidad máxima recomendada solo en la tubería mencionada.

Con un aumento de la población del 200 %, la presión mínima cae hasta un valor muy bajo de 1,31 mca y la velocidad máxima sube hasta los 3,12 m/s. En este punto, cualquier pico de demanda dejaría sin abastecimiento a algunos habitantes, por lo que no sería segura esta situación. Las velocidades elevadas de más de 3 m/s en estos casos solo se dan en 2 tuberías, por lo que unas ligeras modificaciones bastarían para mantener unas velocidades recomendables. El límite de presión positiva se encuentra en un aumento del 219 %, cuando la población supera ligeramente los 800.000 habitantes.

Como límite poblacional para un abastecimiento seguro se podría considerar el número de 650.000 habitantes. Es decir, la red está más que preparada, con la infraestructura actual, para soportar un crecimiento poblacional drástico en la ciudad de Vitoria-Gasteiz. Hay que recordar que esto es un hipotético caso en el que se considera que un aumento de población resultaría en un aumento directamente proporcional del consumo.

7 Mención ODS, Diagrama de Gantt y Presupuesto

7.1 Mención ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), son los objetivos aprobados en 2015 por la Organización de Naciones Unidas (ONU), en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. El principal objetivo de esta agenda es que todos los países y sociedades mejoren la vida de las personas, sin dejar a nadie atrás, consiguiendo un desarrollo sostenible. Con esa finalidad nacen los 17 ODS, estableciendo una guía para erradicar la pobreza de la mano de un crecimiento económico y cumplimentando tanto las necesidades sociales como las ambientales [42].

La Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), al igual que muchas otras organizaciones, ha adoptado los ODS como una forma de guía que alinea su labor con los grandes desafíos globales y humanos, asegurándose de que no deja a nadie atrás [43]. Este TFG forma parte de la UPV/EHU, y se alinea con varios de estos objetivos mostrados en la Figura 29, contribuyendo a la consecución de estos. Cada objetivo cuenta con varias metas a lograr que en total suman 169 [44].



FIGURA 29. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS). FUENTE: [42].

En primer lugar, el objetivo que principalmente se relaciona con este TFG es el Objetivo 2: Agua limpia y saneamiento. La meta 6.1 trata de lograr el acceso a agua potable, justamente lo que hace AMVISA en el territorio alavés manteniendo unos niveles mínimos en cuanto a calidad (meta 6.3). Este TFG trata de analizar el abastecimiento de agua potable a toda la población de Vitoria-Gasteiz actual y a su futuro aumento. Con este trabajo se ayuda a implementar una herramienta que ayude a la gestión integral de los recursos hídricos (meta 6.5) y a aumentar su

uso eficiente (meta 6.4). También fomenta la creación de capacidades de gestión del ciclo integral del agua (meta 6.A), ya que se pretende controlar y modelar una buena parte de este ciclo que es la distribución.

El Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura también se alinea directamente con el MD de la RDA de Vitoria-Gasteiz. La meta 9.1 trata de mantener una infraestructura sostenible, la cual se logra al renovar gran parte de la red de FC a FD, material recuperable tras su fundición. Esta renovación está directamente relacionada con la modernización de infraestructura (meta 9.4) y el apoyo a infraestructuras sostenibles y resilientes (meta 9.A). El aumento de investigación, desarrollo tecnológico y de innovación (metas 9.5 y 9.B) se sitúan en las raíces de este trabajo, ya que se ha tratado de realizar un MD de una red física. El aumento de las TIC (meta 9.C) se hace presente a la hora de obtener los datos para poder actualizar las demandas y los patrones en toda la red.

Por último, como tercer objetivo al cual este TFG se alinea, en un nivel un algo inferior a los dos anteriores, es el Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. La red tratada en este TFG es una red ubicada mayoritariamente en una ciudad, por lo que el uso sostenible del agua en la ciudad depende directamente de esta red. Las metas 11.5 y 11.B tratan de reducir los riesgos por desastres que puedan ocurrir en una ciudad, como lo son los reventones en tuberías de la RDA. Un análisis de la red como el que se ha llevado a cabo ayuda directamente a la prevención de percances en la red, que abarcan desde breves cortes de agua hasta inundaciones.

7.2 Planificación temporal

Tras la asignación de las prácticas y TFG al autor por parte del Aula del Agua AMVISA a mediados de enero de 2024, este necesitó aproximadamente un mes para familiarizarse con las herramientas informáticas utilizadas: EPANET, QGIS y QGISRed, ya que eran desconocidas. A principios de marzo, una vez se tenía un manejo considerable, desde AMVISA se compartió el archivo de la red inicial, y empezó la actualización de la red respecto al modelo inicial. Durante aproximadamente mes y medio se estuvo actualizando los tramos de la red que se habían renovado desde el año 2010.

A principios de mayo el trazado de la red estaba finalizado, y con ello se actualizaron las demandas de los nodos y los patrones de los nodos principales. A mediados de mayo, se trató el tema de la incorporación de la red de Mandojana, ya que era uno de los temas más actuales de AMVISA en ese momento, decidiendo incluirlo en el trabajo. Desde mediados de mayo hasta mediados de junio se redactó el estado del arte del TFG, costando tanto tiempo por la cantidad de información a depurar. En la recta final de junio y primera semana de julio, se ha realizado y redactado la comparación de los modelos, así como las demás partes del desarrollo y del TFG, y su revisión. La elaboración de la presentación se realiza la semana de la defensa del TFG. El transcurso de este periodo de aproximadamente cinco meses y medio coincide básicamente con

el tiempo de prácticas en el Aula del Agua AMVISA como se puede ver en el diagrama de Gantt de la Figura 30.

Tareas	Mes	Febrero				Marzo					Abril				Mayo					Junio				Julio			
	Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4
Aprendizaje QGIS		■	■	■	■																						
Aprendizaje EPANET		■	■	■	■																						
Aprendizaje QGISRed				■	■	■	■																				
Corrección de errores						■																					
Actualización de trazados								■	■	■	■	■	■	■													
Actualización de patrones														■													
Actualización de demandas															■	■											
Caso de estudio																■	■										
Comparación y análisis																				■	■	■	■				
Redacción TFG																						■	■	■	■	■	■
Elaboración de presentación																											
Defensa TFG																											■

FIGURA 30. DIAGRAMA DE GANTT.

7.3 Presupuesto

En la Tabla 12 se ve el presupuesto estimado para la realización de este TFG. En primer lugar, aparecen los costes de mano de obra, en los que se diferencian los costes del estudiante, de los dos profesores tutores y del responsable del área de abastecimiento en la empresa AMVISA. La duración de las prácticas y TFG consta de un total de 750 horas. El tiempo invertido por cada tutor es de aproximadamente 50 horas y el del instructor de AMVISA de 75 horas.

Como gastos directos se han tenido en cuenta 1250 € en gastos de uso de la Sala del Agua en seis meses a repartir entre los diez miembros que formamos parte de esta. También se ha estimado un importe de 25 € en transporte. La ayuda económica que recibe el alumno es de 3000 € por lo que también se incluye como gasto directo.

En cuanto a los gastos amortizables se contemplan el ordenador personal y el equipamiento de la sala del agua. El primero tiene un precio de 600 € amortizado a un total de cinco años, por lo que en el periodo del TFG se amortiza un 10 %. Los gastos del equipamiento de la sala del agua están valorados en 20.000 €, divididos entre diez estudiantes, y amortizado a 10 años. Esto resulta en un gasto de 100 € personal en un periodo de seis meses.

En general, el coste de la realización del TFG se determina por el coste de mano de obra y la ayuda económica recibida. Todo esto suma un total de 23.185 € aproximados.

TABLA 12. PRESUPUESTO DEL TFG.

Mano de obra	Cantidad (h)	Coste unitario (€/h)	Coste (€)
Estudiantil	750	12 €	9.000 €
Profesorado tutores	100	60 €	6.000 €
Instructor AMVISA	75	65 €	4.875 €
Subtotal mano de obra			19.875 €
Gastos directos	Cantidad (u)	Coste unitario (€/u)	Coste (€)
Gastos Sala del Agua	1	125 €	125 €
Transporte	1	25 €	25 €
Ayuda económica	1	3.000 €	3.000 €
Subtotal gastos directos			3.150 €
Gastos de amortización	Amortización (%)	Precio (€)	Coste (€)
Ordenador personal	10%	600 €	60 €
Equipamiento Sala del Agua	5%	2.000 €	100 €
Subtotal gastos de amortización			160 €
Coste total TFG			23.185 €

8 Conclusiones y líneas futuras

8.1 Conclusiones

La finalización de este TFG permite sacar varias conclusiones en diferentes aspectos. Tras la actualización del MD, se obtiene una herramienta que es capaz de simular el comportamiento teórico de la RDA de Vitoria-Gasteiz. Con esta herramienta, se puede visualizar la RDA en baja de Vitoria-Gasteiz geolocalizada. También sirve como base de datos de los elementos de la red como el diámetro, la longitud, el material de una tubería o las características de las válvulas. El MD nos permite realizar simulaciones teóricas en las que analizar diferentes aspectos como las presiones, velocidades, alturas o caudales.

Tras analizar la RDA con en el MD se pueden obtener distintas conclusiones. En primer lugar, hay que destacar que en la ciudad de Vitoria-Gasteiz hay una infraestructura muy capaz, que soportaría holgadamente un aumento de población muy elevado, incluso de un 150 % superior a la actual. Solo serían necesarios renovar unos metros de red en tuberías concretas, para soportar tal aumento de población.

El aumento de población de Vitoria-Gasteiz desde 2010 no ha significado un aumento de consumo, sino todo lo contrario. Las buenas prácticas de los ciudadanos de la capital han hecho que el consumo medio de agua por habitante haya disminuido un 20 %. Esta disminución de la demanda, junto con la reducción de la excesiva demanda planteada en el modelo antiguo, tiene tanto efectos positivos como negativos en la red que pueden ser estudiados mediante el MD.

Estudiando el modelo, se puede observar que dentro de los efectos positivos nos encontramos el aumento de la presión en la red que hace que los puntos más críticos se vean beneficiados. Esto se debe a que las pérdidas de carga son menores en el modelo actual comparadas al modelo inicial, evitando que se pierda energía en las tuberías de la red. Las tuberías con velocidades elevadas también notan ese alivio de caudal, reduciendo así su velocidad máxima.

En cuanto a los efectos negativos, esta renovación del MD ha permitido observar cómo los nodos que superaban el límite máximo de presión recomendado son más que en el modelo inicial, dejando a una cuarta parte de la red en un estado de sobrepresión. Además, el sobredimensionamiento de la red, junto con la reducción de demanda, disminuye la velocidad del agua en los tramos de la red. Esto es indeseable ya puede acarrear problemas en la calidad del agua.

Es necesario mencionar que, a pesar de que se están haciendo esfuerzos económicos por retirar el FC de la RDA, todavía quedan aproximadamente 90 km de tuberías que están compuestas con amianto. En los próximos años se espera que las tuberías restantes se sustituyan en su mayoría por las de FD o PE, y eliminar en su totalidad el FC de la red. Aunque afecte negativamente al comportamiento del agua en las tuberías al incorporar coeficientes de fricción superiores, esto

es necesario por temas legales. Sin embargo, la reducción de la demanda de agua tapa este aumento de pérdidas de carga en la red debido a las tuberías.

Respecto al análisis de viabilidad de integración de la red de Mandojana, utilizando el MD actualizado se ha demostrado que la incorporación de esta red a actual RDA de Vitoria-Gasteiz es posible y no afecta negativamente al suministro. Los habitantes de la zona de Mandojana obtendrían acceso al mismo suministro que los habitantes de Vitoria-Gasteiz, brindándoles mayor seguridad en el abastecimiento de agua de calidad.

Tras repasar los objetivos iniciales del TFG, se puede afirmar que se han cumplido tres de los cinco propuestos. El MD de la RDA en baja de Vitoria-Gasteiz se ha actualizado correctamente, con un grado de detalle en el trazado elevado. La actualización del modelo se ha realizado de forma correcta y los datos obtenidos en el corresponden con los que muestra la red real., Se han estudiado dos casos prácticos de relevancia para AMVISA: la integración de la red de Mandojana y un análisis de estrés de la red. Se ha comprobado como los objetivos planteados eran excesivamente ambiciosos en lo que respecta a los dos últimos objetivos: calibración del modelo y creación del gemelo digital. Estos últimos puntos muestran el camino a seguir de este trabajo, el cual se analiza en las líneas futuras.

Por último, hay que destacar las posibilidades que nos ofrecen los softwares utilizados: QGIS, EPANET y QGISRed. Estas herramientas gratuitas y de uso libre permiten simular una red de distribución de agua de la dimensión de la de Vitoria-Gasteiz o incluso superiores. En este TFG solo se han mencionado unas pocas de las numerosas capacidades que tienen en el análisis de RDAs.

8.2 Líneas Futuras

Este MD de la RDA de Vitoria-Gasteiz sirve como base de cara a una digitalización de la gestión integral del ciclo del agua en AMVISA. Para conseguir un SWM, lo primero y esencial es tener un modelado detallado y actual de la red. Este MD, aunque todavía falten por incluir bastantes elementos, se puede considerar una buena base para lograr una SWG. En breve se resumen los pasos siguientes a realizar sobre este trabajo, de cara a conseguir los objetivos de AMVISA en la digitalización de los sistemas.

Sobre este MD, faltaría por añadir la red de Goikolarra, y los bombeos de las zonas externas a la red que abastecen el agua en alta hasta las localidades más lejanos. Una vez se finalice la modelización del MD en su totalidad habría que validar el modelo. Para ello se utilizarían datos históricos de medidores de caudalímetros y manómetros situados en puntos específicos de la red, y se contrastarían con los resultados que arroja el modelo en las simulaciones. Comprobaciones puntuales de esta instrumentación permitieron la aceptación del primer modelo. En las zonas donde variasen los resultados habría que estudiarlos detenidamente y solucionarlos, para dejar un modelo hídrico que se asemejase lo máximo posible a la realidad física.

Una vez el MD sea contrastado, se pueden abrir diferentes áreas en las que introducir datos tomados en tiempo real. Para ello el primer paso sería la instalación primero en la red y a más largo plazo en las viviendas de sensores y equipos que realizasen mediciones inteligentes sobre parámetros como el caudal, la presión o la velocidad de la red. Estas mediciones se introducirían como variables dentro del MD, permitiendo así obtener en tiempo real los patrones de consumo, las variaciones de altura de los depósitos o las demandas en las acometidas y poder tomar decisiones en tiempo real sobre incidentes que afecten a la red o estudiar posibles cambios a futuro.

La RDA permite una supervisión con tiempos de refresco relativamente largos, de cinco a quince minutos, lo cual es suficiente para que el motor de cálculo EPANET simule la red y obtenga los resultados (1 minuto). Esto supone una monitorización y simulación de la red en tiempo real.

Con esto, se obtendría un GD de la RDA de Vitoria-Gasteiz que reflejase en tiempo real su funcionamiento y permitiese su simulación. Además, con esta herramienta, comparando las simulaciones y los resultados reales, se podrían detectar pérdidas, o consumos excesivos de agua. La medición de la calidad también sería posible, así como elevadas pérdidas de carga que hiciesen que los consumos energéticos de las bombas fuesen elevados. Añadido un sistema SCADA se puede monitorizar la red y obtener un histórico de su funcionamiento lo que permite tener una herramienta de registro y estrategia para el mantenimiento de la red. Así se podría tener un control integral en todo momento de la RDA de Vitoria-Gasteiz, con todos los beneficios que ello conlleva.

9 Bibliografía

- [1] Amvisa, «Amvisa - Nuestra empresa». Accedido: 10 de junio de 2024 [En línea]. Disponible en:
https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=u_44a0bd70_130ab4f1005__7fc0
- [2] Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, «Vitoria-Gasteiz - Next Generation EU». Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=u_1305b67_18f01830b70_50d2
- [3] Campus de Álava - UPV/EHU, «Aula del Agua AMVISA». Accedido: 5 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/araba/aula-amvisa>.
- [4] C. B. Ynzunza Cortés, J. M. Izar Landeta, J. G. Bocarando Chacón, F. Aguilar Pereyra, y M. Larios Osorio, «El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras», *Conciencia Tecnológica*, n.o 54, 2017. ISSN-e: 1405-5597.
- [5] D. García Martínez, «Gemelo Digital», UEM STEAM Essentials, 2022, [En línea]. Disponible en:
https://universidadeuropea.com/resources/media/documents/23_STEAM_GEMELODIGITAL_RZ2023.pdf
- [6] M. Varas Chiquito, J. C. García Plua, M. E. Bustamante Chong, y C. Bustamante Chong, «Gemelos digitales y su evolución en la industria», *RECIMUNDO. Saberes de Conocimiento*, pp. 300-308, 2020. doi: 10.26820/recimundo/4.(4).noviembre.2020.300-308.
- [7] F. T. Tao, H. Zhang, A. Liu, y A. Y. C. Nee, «Digital Twin in Industry: State-of-the-Art», *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, n.o 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 2405-2415, 2018. doi: 10.1109/tii.2018.2873186.
- [8] H. M. Ramos et al., «New Challenges towards Smart Systems' Efficiency by Digital Twin in Water Distribution Networks», *Water*, vol. 14, n.o 8. MDPI AG, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/w14081304>.
- [9] P. Conejos Fuertes, F. Martínez Alzamora, M. Hervás Carot, y J. C. Alonso Campos, «Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks», *Urban Water Journal*, vol. 17, n.o 8. Informa UK Limited, pp. 704-713, 2020. doi: 10.1080/1573062x.2020.1771382.
- [10] Regaber, «Automatización integral vs SCADA: Mejorando la eficiencia en canales de riego». Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://regaber.com/blog/automatizacion-integral-vs-scada-mejorando-la-eficiencia-en-redes-de-canales-de-riego/>

- [11] K. M. Koo, K. H. Han, K. S. Jun, G. Lee, y K. T. Yum, «Smart water grid research group project: An introduction to the smart water grid living-lab demonstrative operation in yeongjong island, korea», Sustainability (Switzerland), vol. 13, n.o 9, mayo 2021, doi: 10.3390/su13095325.
- [12] J. Li, X. Yang, y R. Sitzenfrei, «Rethinking the framework of smart water system: A review», Water (Switzerland), vol. 12, n.o 2, feb. 2020, doi: 10.3390/w12020412.
- [13] M. Mutchek y E. Williams, «Moving Towards Sustainable and Resilient Smart Water Grids», Challenges, vol. 5, n.o 1. MDPI AG, pp. 123-137, 2014. doi: 10.3390/challe5010123.
- [14] QGISRed, «Qué es QGISRed». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://qgisred.upv.es/presentacion/#quees>
- [15] Geograma, «¿Qué es GIS o Sistemas de información geográfica?» Accedido: 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.geograma.com/blog/que-es-gis/>
- [16] QGIS, «QGIS Desktop 3.28 User Guide». Accedido: 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://docs.qgis.org/3.28/pdf/en/QGIS-3.28-DesktopUserGuide-en.pdf>
- [17] A. Morales, «Mapping GIS Top 10 plugins para QGIS y cómo instalarlos». Accedido: 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mappinggis.com/2020/03/10-plugins-para-qgis-instalacion/>
- [18] US EPA, «EPANET 2.2.0: An EPA and Water Community Collaboration». Accedido: 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sciencematters/epanet-220-epa-and-water-community-collaboration>
- [19] L. A. Rossman, H. Woo, M. Tryby, F. Shang, R. Janke, y T. Haxton, «EPANET 2.2 User Manual», U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, 20 de mayo de 2020. doi: EPA/600/R-20/133.
- [20] L. Barreto Dillon, «¿Sabes qué son los sistemas de abastecimiento de agua? | SSWM». Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/acerca-de-esta-herramienta/%C2%BFsabes-qu%C3%A9-son-los-sistemas-de-abastecimiento-de-agua%3F>
- [21] G. Eytan y D. Spuhler, «Red de distribución comunitaria | SSWM». Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribucion-comunitaria>
- [22] V. Álvarez Fernandez, «Red de Abastecimiento», 2012. Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.lis.edu.es/uploads/8b982502_2156_46f9_8799_603901b43c8d.pdf
- [23] Saint-Gobain PAM, «Tubería de Fundición a través de la historia». Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pamline.es/tuberia-fundicion-traves-historia>

- [24] R. Begas Calderón, «Un poco más sobre tuberías de fibrocemento y su reparación». Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/un-poco-mas-sobre-tuberias-de-fibrocm-ento-y-su-reparacion>
- [25] Jardinday, «Tubos de polietileno, tipos y características». Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://jardinday.com/tipos-y-caracteristicas-de-las-tuberias-de-polietileno/>
- [26] J. P. Guerrero Pasgau, «Características de las tuberías de hormigón con camisa de chapa en obras de regadío. Aplicaciones especiales», Interempresas - Agua. Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/471080-Caracteristicas-tuberias-hormigon-camisa-chapa-obras-regadio-Aplicaciones-especiales.html>
- [27] Alaska Department of Environmental Conservation, «Introduction to Small Water Systems Correspondence Course». Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dec.alaska.gov/water/operator-certification/intro-to-small-water-systems-course/>
- [28] Jazmine, «Válvulas de Compuerta», Valvulas Online. Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://valvulasonline.com/2021/06/valvulas-de-compuerta/>
- [29] Comisión Nacional del Agua, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento | Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable. Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro12.pdf>
- [30] AMVISA, «Memoria de Sostenibilidad 2022», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/es/94/11/99411.pdf>
- [31] I. Errasti Arrieta, «Ingenieritza fluidoen mekanika», Ingenieritza Nuklear eta Jariakin Mekanika Saila | UPV/EHU, vol. I TOMOA. Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1aSUbU6VaolD9clPI1YzIOx-rjMNEaqGD/view?usp=sharing>
- [32] I. Errasti Arrieta, «Ingenieritza fluidoen mekanika», Ingenieritza Nuklear eta Jariakin Mekanika Saila | UPV/EHU, vol. II TOMOA, Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/11yq4sjhEiktgCtPDKnNHc-j2hDA8tUel/view?usp=sharing>
- [33] I. Errasti Arrieta, «Ingenieritza fluidoen mekanika», Ingenieritza Nuklear eta Jariakin Mekanika Saila | UPV/EHU, vol. III TOMOA, Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1QKUE1ZuhBYcw-zDKzuRLdiOhQusl3bOw/view?usp=sharing>

- [34] AMVISA, «Memoria 2010», 2011. Accedido: 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vitoria-gasteiz.org/we001/was/we001Action.do?idioma=es&accionWe001=adjunto&nombre=41816.pdf>
- [35] AMVISA, «Consumo de agua en Vitoria-Gasteiz 2022». 2023. Accedido: 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/es/88/18/98818.pdf>
- [36] «¿Cuánta gente vive en cada barrio de Vitoria-Gasteiz?» Accedido: 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gasteizhoy.com/poblacion-vitoria-barrrios-2023/>
- [37] Canal de Isabel II, «NORMAS PARA REDES DE ABASTECIMIENTO», 2021. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/3964488/Norma+Redes+Abastecimiento+V4+2021.pdf>
- [38] Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, «Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial», 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Norma%20dise%C3%B1o%20y%20construccion%20sistemas%20agua,%20saneamiento%20y%20pluvial.pdf>
- [39] D. Mora Melia, «Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia. Tesis Doctoral», 2012. doi: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/16803>.
- [40] J. R. Hechavarría Hernández, «FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL DISEÑO DE REDES DE ABASTECIMIENTO», Revista Científica ECOCIENCIA, vol. 4, n.o 3, pp. 113-134, 2017, doi: <https://doi.org/10.21855/ecociencia.43.35>.
- [41] N. Gatón, «Sin agua potable en cuatro pueblos de Vitoria», GasteizHoy. Accedido: 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gasteizhoy.com/sin-agua-potable-en-cuatro-pueblos-de-vitoria/>
- [42] Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible». Accedido: 2 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [43] UPV/EHU, «EHUagenda 2030». Accedido: 5 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/ehuagenda-2030/>
- [44] Gobierno de España, «METAS DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE». Accedido: 5 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/documentos/metas-ods.pdf>
- [45] Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, «Estudios y estadísticas - Divisiones territoriales del término municipal». Accedido: 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/es/35/15/73515.pdf>

10 Anexos

Anexo I. Datos de entrada QGISRed

En este anexo se muestran los parámetros que describen cada uno de los elementos utilizados en QGISRed que dan forma a la RDA de Vitoria-Gasteiz. Estos son las tuberías, los nodos, las válvulas y el reservorio de Araka. En las figuras siguientes se muestran todos los datos de entrada que se pueden introducir en QGISRed. Sin embargo, en el apartado 2.2.4 se enumeran solo los datos introducidos.

Junction N12666

^ Id Properties

Id:

X:

Y:

Tag:

Description:

^ Hydraulic Properties

Elevation:

Total demands: 1

Base Demand:

Demand Pattern:

Emitter Coeff.

^ Quality Properties

Initial Quality:

Source Type:

FIGURA 31. ANEXO I. DATOS DE ENTRADA NODOS.

Pipe T-2643256.1

^ Id Properties

Id:

Start Node:

End Node:

Tag:

Description:

^ Hydraulic Properties

Length:

Diameter:

Roughness:

Loss Coeff.:

Material:

Instal. Date:

Initial Status:

Bulk Coeff.:

Wall Coeff.:

FIGURA 32. ANEXO I. DATOS DE ENTRADA TUBERÍAS.

Valve **V-2651528**

Id Properties

Id:

Start Node: ▾

End Node: ▾

Tag:

Description:

Hydraulic Properties

Diameter:

Type: ▾

Setting:

Loss Coeff.:

Fixed Status: ▾

FIGURA 33. ANEXO I. DATOS DE ENTRADA VÁLVULAS.

Reservoir **ARAKA**

Id Properties

Id:

X:

Y:

Tag:

Description:

Hydraulic Properties

Total Head:

Head Pattern: ▾  

Quality Properties

Initial Quality:

Source Type: ▾

FIGURA 34. ANEXO I. DATOS DE ENTRADA RESERVIORIOS.

Anexo II. Caudales de la red actualizada

En este apartado se muestran los caudales que el MD de la RDA actualizada de Vitoria-Gasteiz recoge a las nueve de la mañana. En la zona norte, destacan el principal abastecimiento desde la ETAP de Araka y el abastecimiento secundario desde la zona del Gorbea. En esta franja horaria, el depósito de Araka funciona como otro punto más de abastecimiento. En la Figura 35. Anexo II, destaca el característico anillo con caudales elevados que forma la RDA de Vitoria-Gasteiz, del cual salen ramales hacia el interior y exterior.

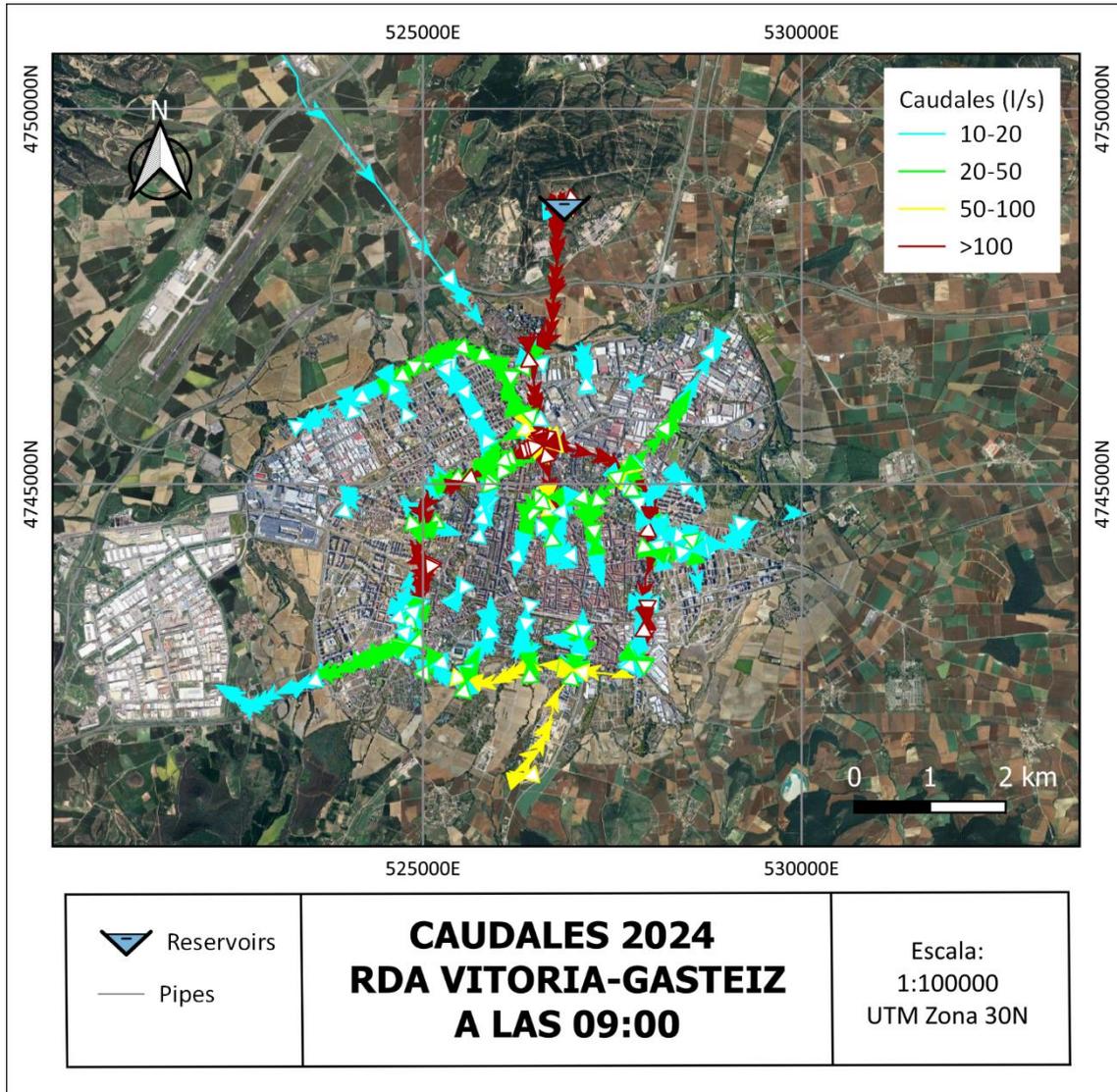
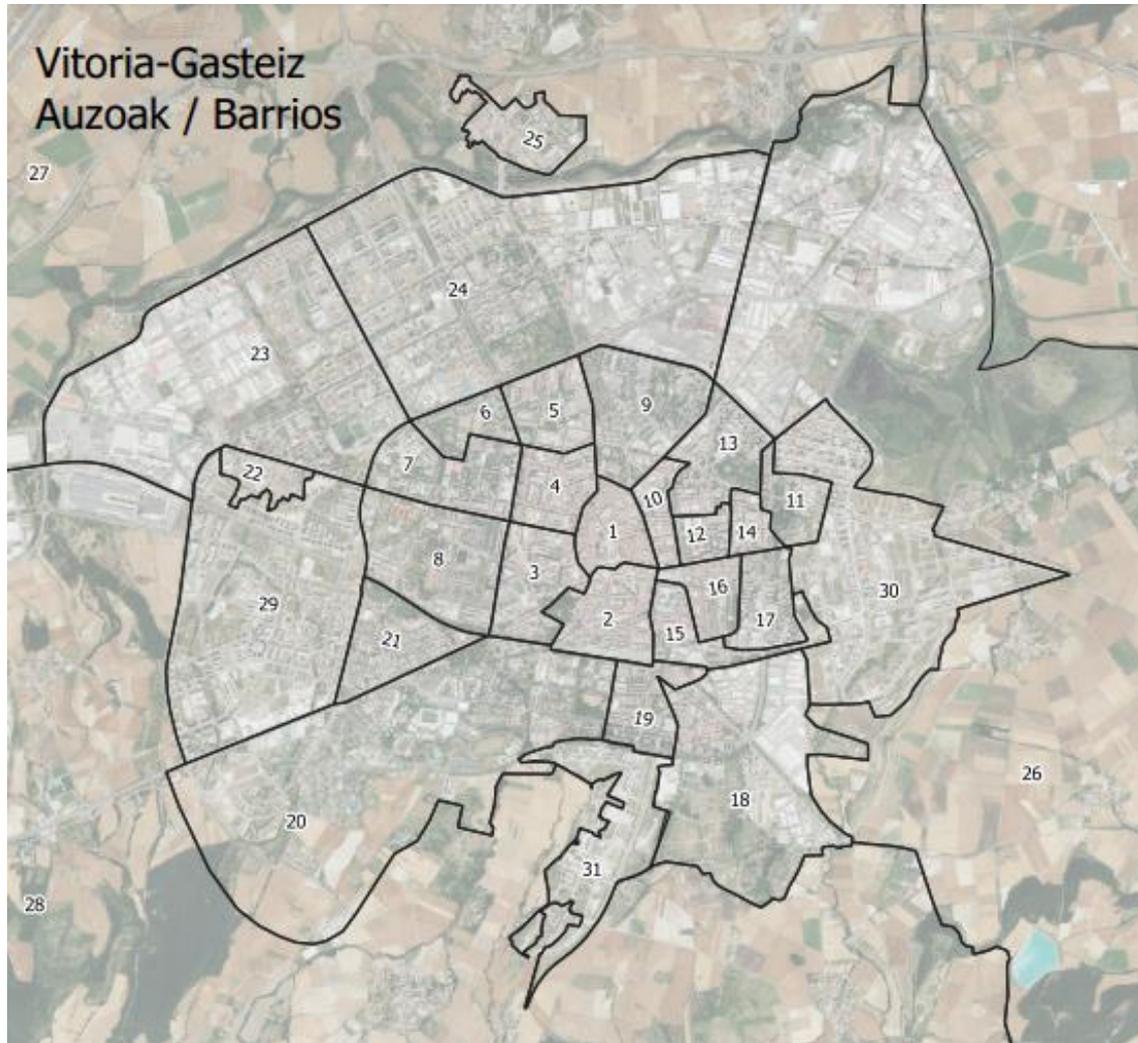


FIGURA 35. ANEXO II. CAUDALES EN LA RDA DE VITORIA-GASTEIZ.

Anexo III. Barrios de Vitoria-Gasteiz

En la Figura 36. Anexo III, se pueden visualizar las divisiones territoriales del término municipal, también conocidas como los barrio de la ciudad de Vitoria-Gasteiz.



1 Casco Viejo	9 Zaramaga	17 Santa Lucia	25 Abetxuko
2 Ensanche	10 Anglo-Vasco	18 Adurtza	26 Zona Rural Este
3 Lovaina	11 Arantzabela	19 San Cristóbal	27 Zona Rural Noroeste
4 Coronación	12 Santiago	20 Mendizorrotza	28 Zona Rural Suroeste
5 El Pilar	13 Aranzabizkarra	21 Ariznabarra	29 Zabalzana
6 Gazalbide	14 Arana	22 Ali	30 Salburua
7 Txagorritxu	15 Desamparados	23 Sansomendi	31 Goikolarra
8 San Martín	16 Judimendi	24 Arriaga-Lakua	

FIGURA 36. ANEXO III. BARRIOS DE VITORIA-GASTEIZ. FUENTE: [45].

Anexo IV. Red Goikolarra, Arechavaleta y Gardelegi

La red que se recoge en la Figura 37. Anexo IV, muestra la red casi independiente de la RDA de Vitoria-Gasteiz. En ella se muestran los depósitos de Gardelegi y S-19.

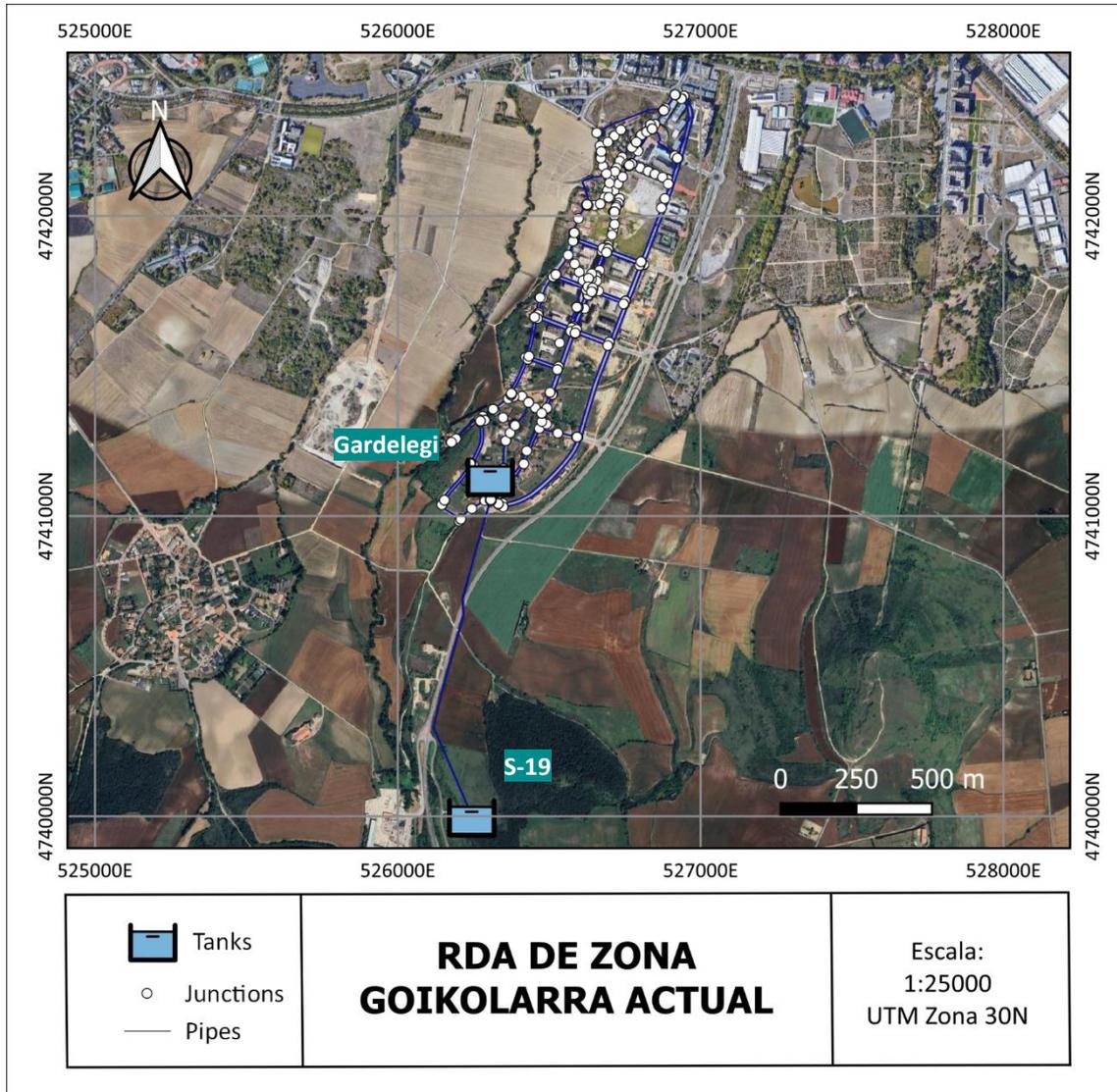


FIGURA 37. ANEXO IV. RDA ZONA GOIKOLARRA, ARECHAVALETA Y GARDELEGI.

Anexo V. Demandas Salburua

Este anexo recoge las demandas aplicadas en los nodos de Salburua antes y después de la actualización.

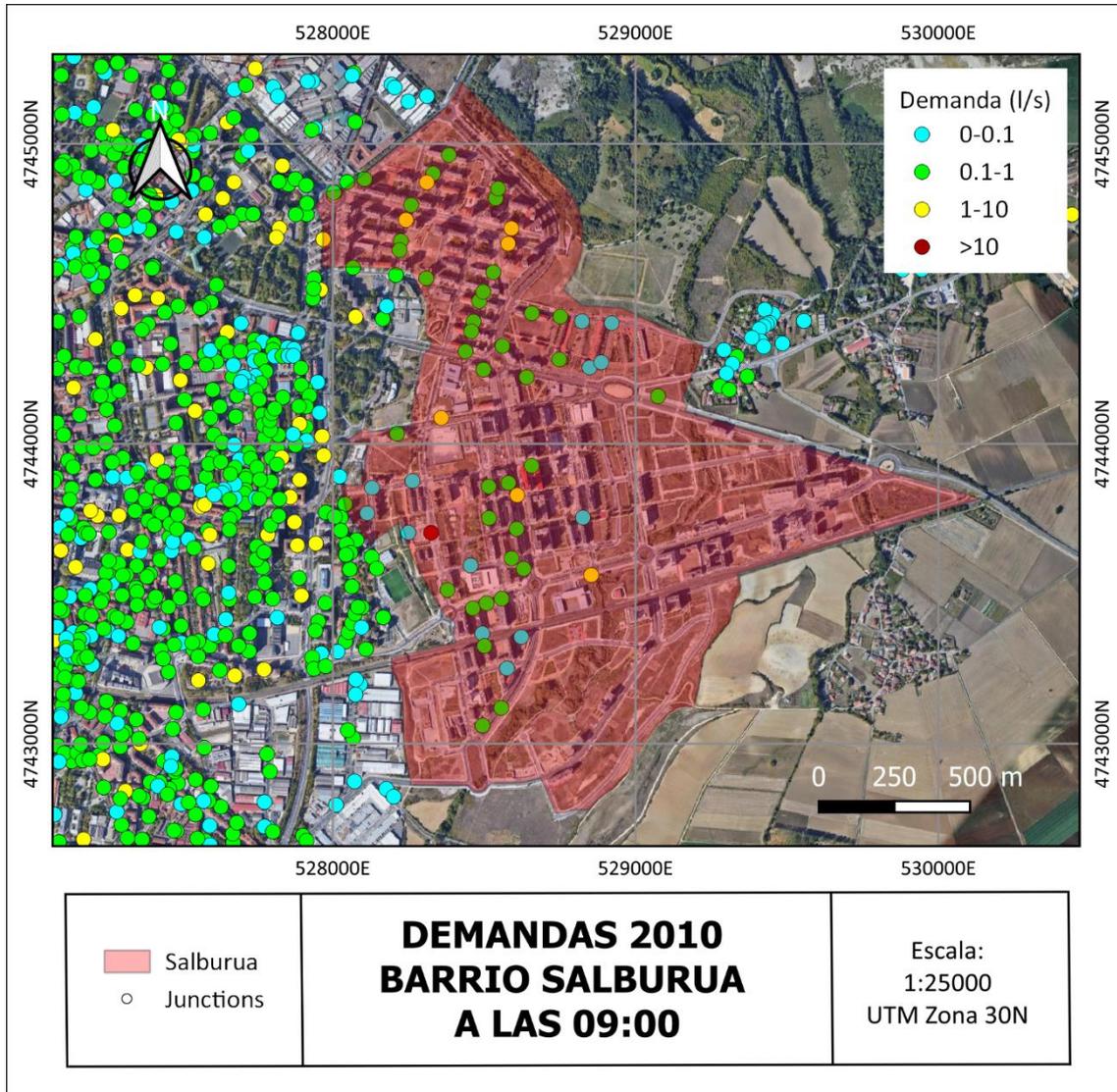


FIGURA 38. ANEXO V. DEMANDAS BARRIO DE SALBURUA 2010.

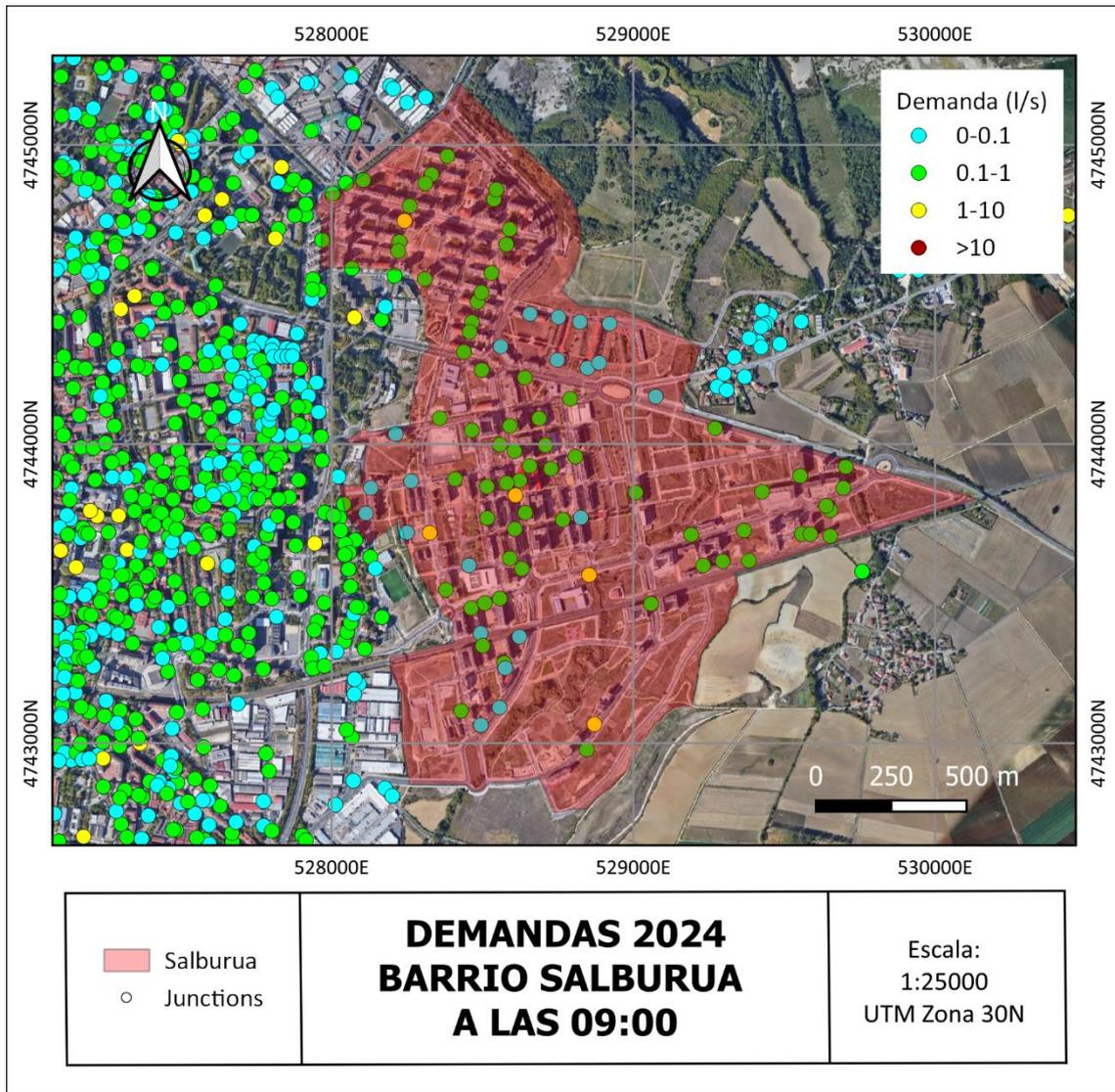


FIGURA 39. ANEXO V. DEMANDAS BARRIO DE SALBURUA 2024.

Anexo VI. Mapas análisis y comparación de red

En este apartado se recogen cuatro figuras que han sido utilizadas en la comparación y análisis de las redes. La Figura 40. Anexo VI muestra las presiones que refleja el actual MD en la zona sur de Vitoria-Gasteiz. La Figura 41. Anexo VI recoge las presiones obtenidas en el modelo anterior. En la Figura 42. Anexo VI se recogen las pérdidas de carga totales en la red renovada, destacando únicamente las tuberías con pérdidas mayores a 0,1 m. En la Figura 43. Anexo VI se muestran también las pérdidas de carga totales, pero esta vez en el modelo antiguo.

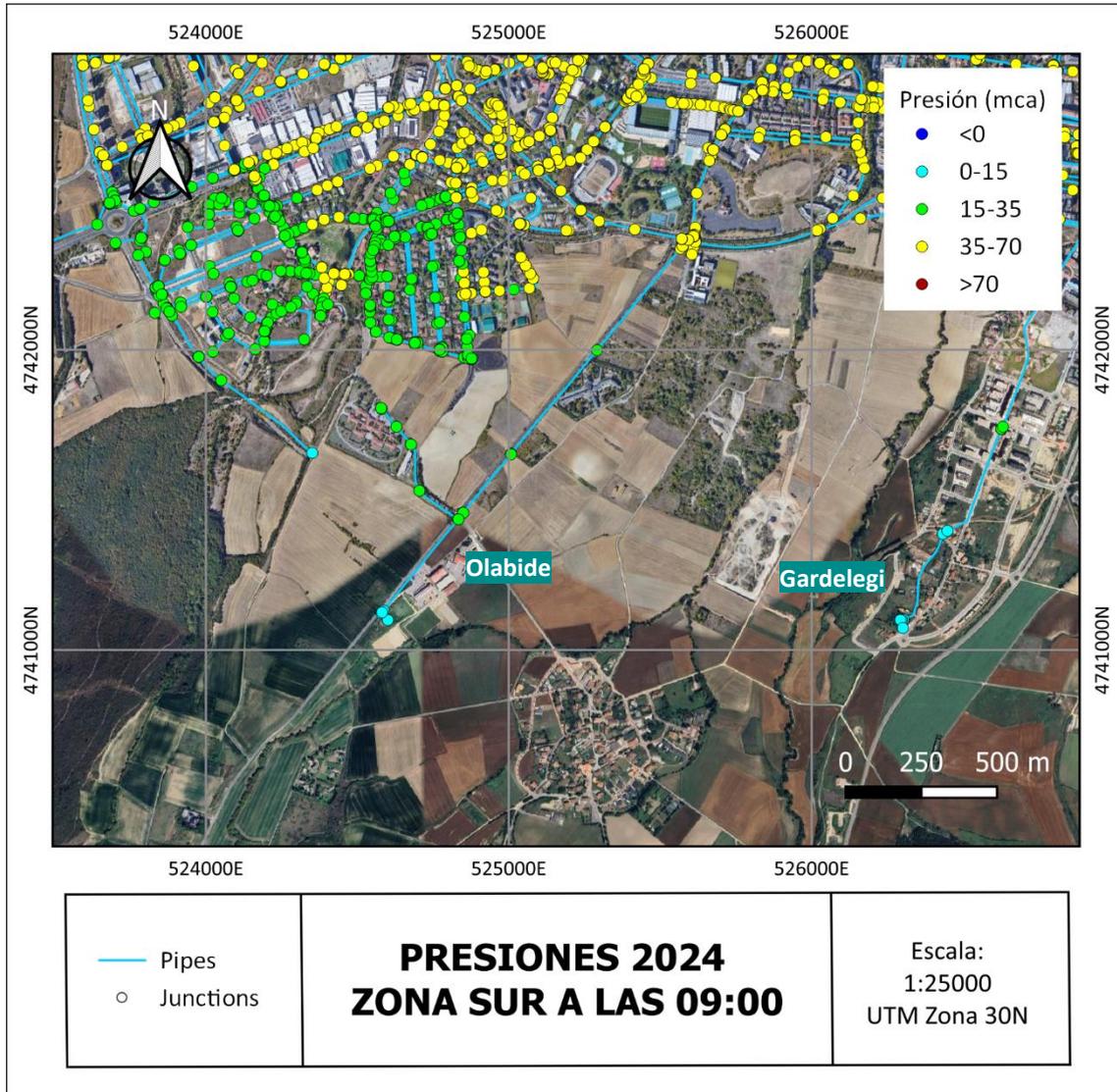


FIGURA 40. ANEXO VI. PRESIONES ZONA SUR 2024.

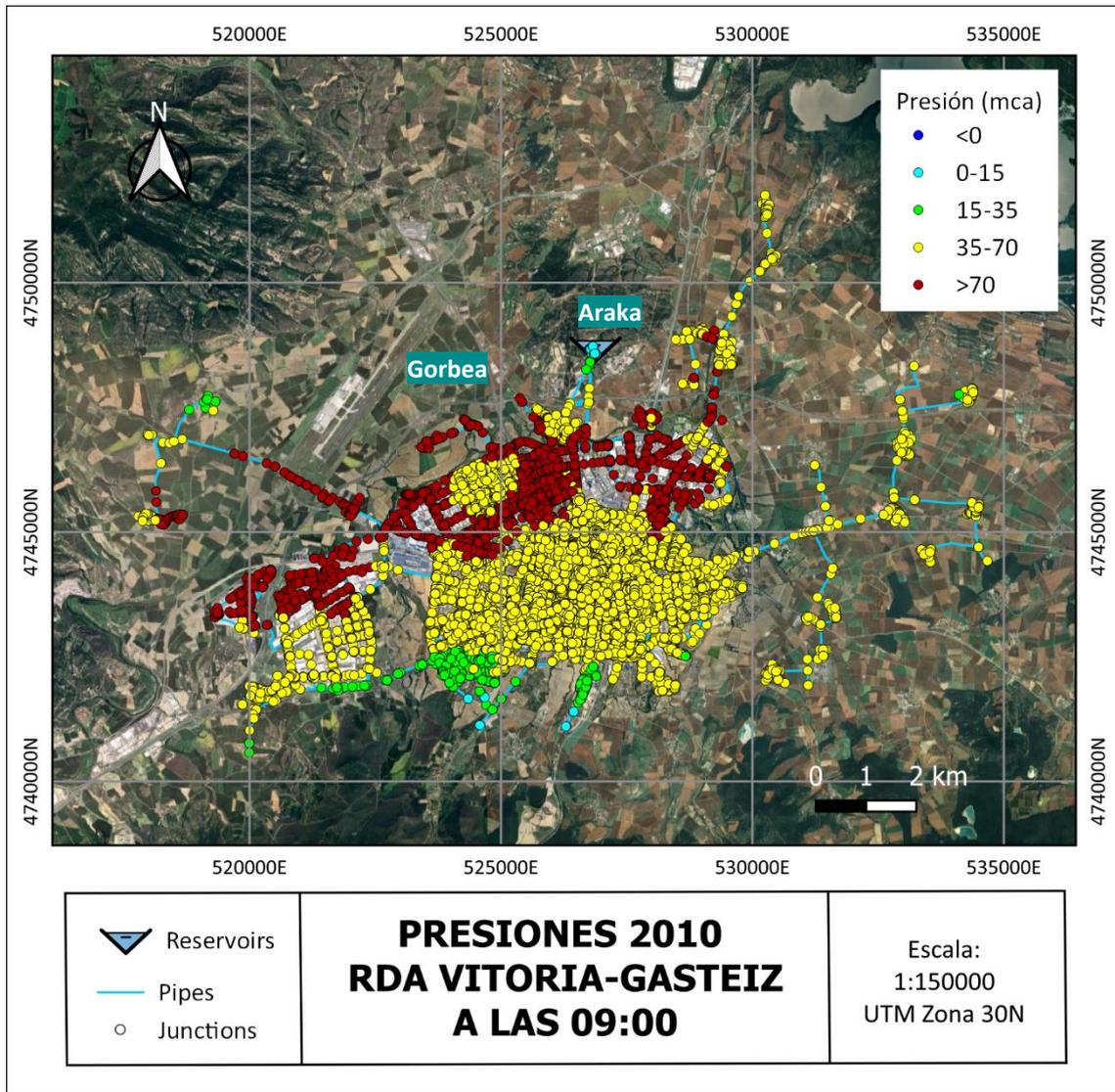


FIGURA 41. ANEXO VI. PRESIONES EN LOS NODOS RDA DE VITORIA-GASTEIZ 2010.

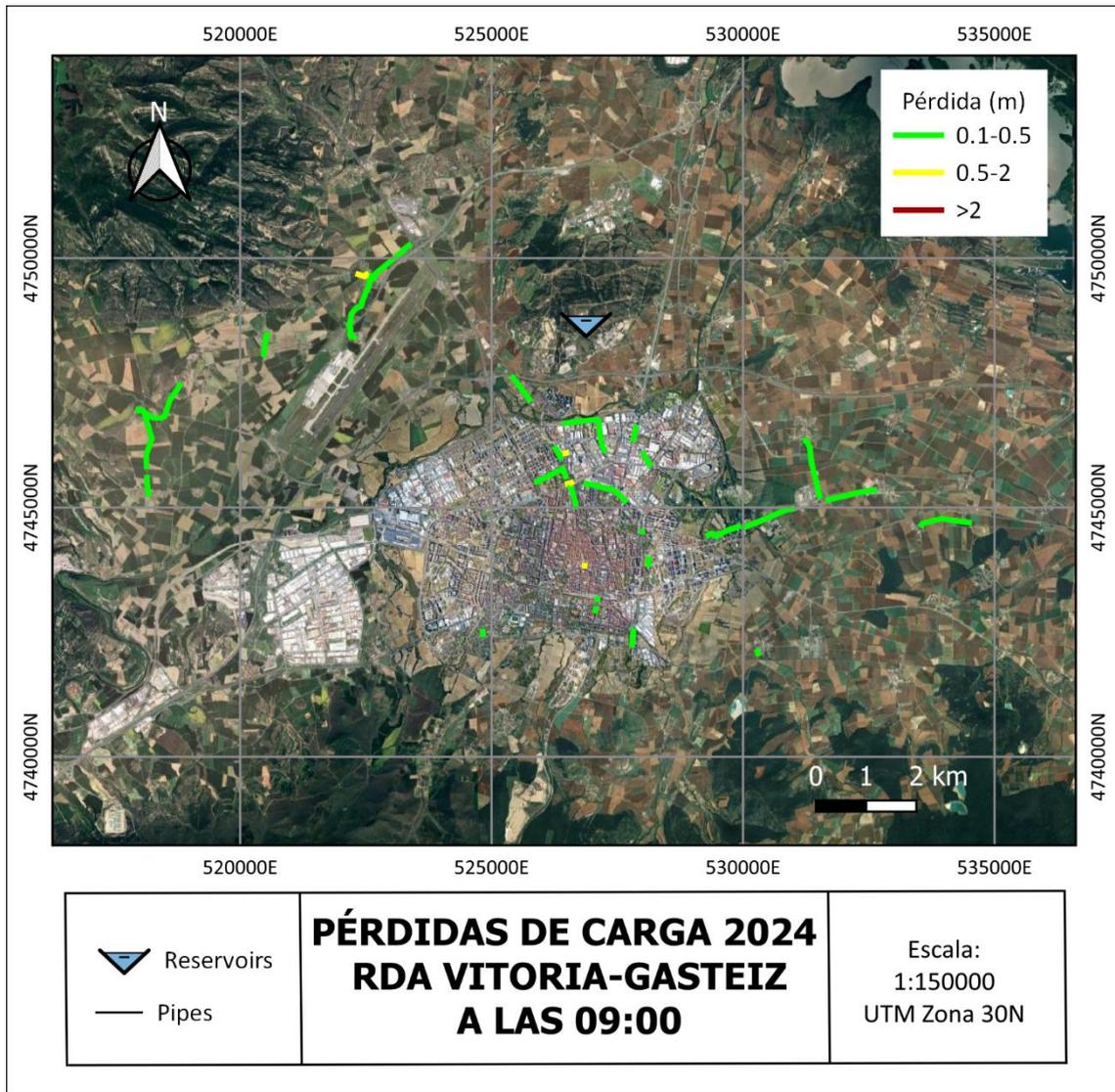


FIGURA 42. ANEXO VI. PÉRDIDAS DE CARGA SUPERIORES ACTUALES.

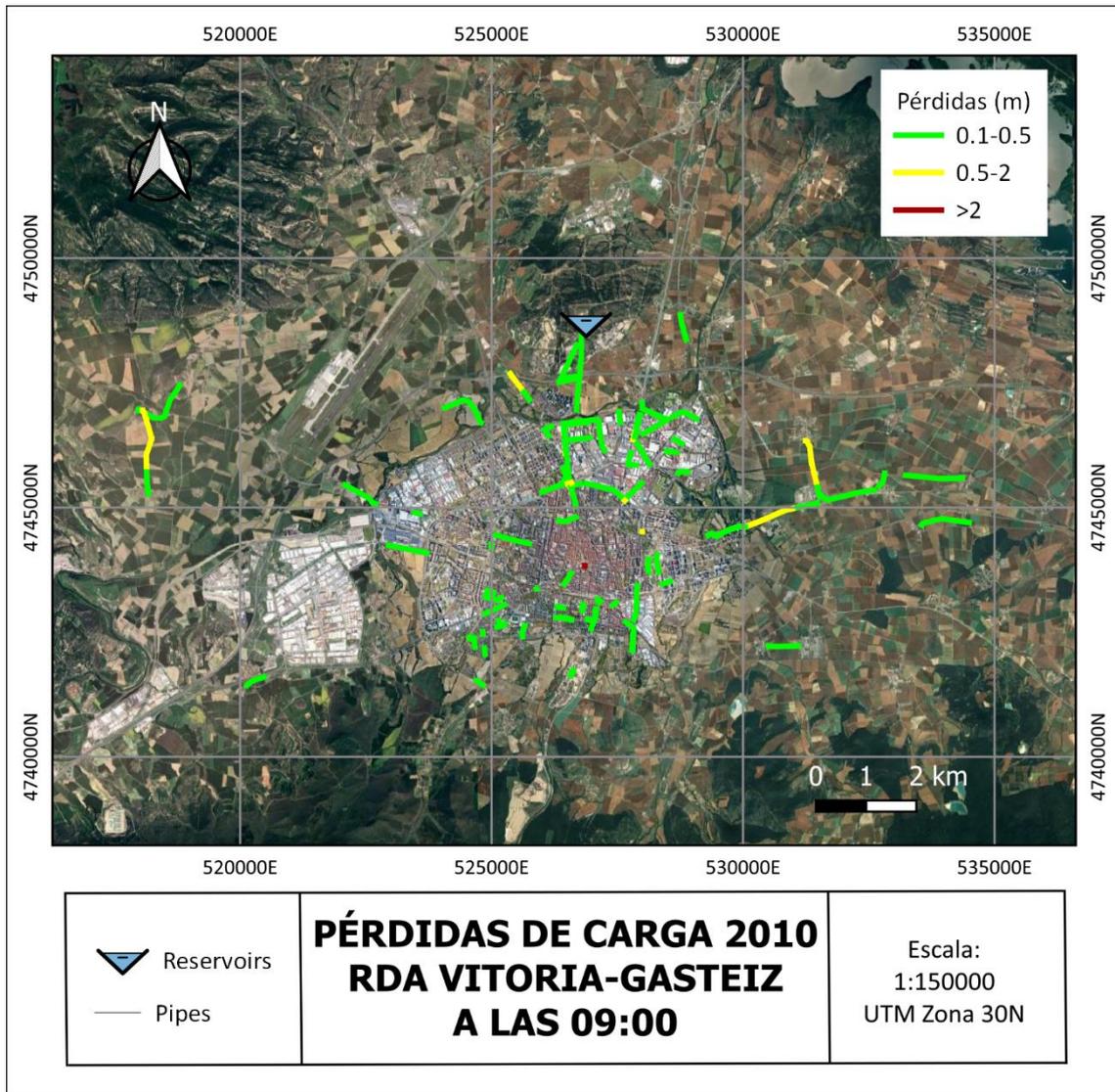


FIGURA 43. ANEXO VI. PÉRDIDAS DE CARGA SUPERIORES EN 2010.