



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Análisis, gestión y modelación de pérdidas de agua en la
ciudad de Panamá

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Calderón de León, Eric Alberto

Tutor/a: Cobacho Jordán, Ricardo

Cotutor/a externo: Ramírez Aguilar, Roberto Xavier

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Trabajo Fin de Máster
***ANÁLISIS, GESTIÓN Y
MODELACIÓN DE PÉRDIDAS DE
AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE
PANAMÁ***

Intensificación: HIDRÁULICA URBANA

Autor:

D. ERIC ALBERTO CALDERÓN DE LEÓN

Tutor:

DR. RICARDO COBACHO JORDÁN

Cotutor:

D. ROBERTO XAVIER RAMÍREZ AGUILAR

Junio, 2024



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihmma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Análisis, gestión y modelación de pérdidas de Agua en la ciudad de Panamá.

Título del TFM en inglés: Analysis, management and modeling of water losses in Panama City.

Título del TFM en Valenciano: Anàlisi, gestió i modelatge de pèrdues d'aigua a la ciutat de Panamá

Alumno: D. ERIC ALBERTO CALDERÓN DE LEÓN

Tutor: DR. D. RICARDO COBACHO JORDÁN

Cotutor/es: D. ROBERTO XAVIER RAMÍREZ AGUILAR

Director experimental:

Fecha de Lectura: Junio, 2024

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

La ciudad de Panamá posee abundantes recursos hídricos debido a su clima tropical y continuas precipitaciones, posicionándose, como uno de los países con mayor seguridad hídrica del continente americano. La abundancia del recurso tiene como ventajas poder abastecerla a precios económicos, la facilidad del suministro, el desarrollo de las distintas industrias; mientras que la desventaja son los volúmenes de agua perdidos por distintos factores como su consumo excesivo en entornos urbanos e industriales, la falta de mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas, uso de dispositivos de medición poco precisos y falta de transparencia de los gestores.

Sin embargo, la ciudad necesita disminuir la cantidad de agua potabilizada para enfrentar los futuros desafíos ambientales que limitan la captación de agua dulce; además de asegurar el desarrollo económico y social de los ciudadanos.

La presente tesis estudia las pérdidas de agua potable en la ciudad desde los puntos de vista teórico al identificar los puntos de mejora de la red, utilizando la información proporcionada por el abastecimiento y aproximando los sumideros de las pérdidas reales y aparentes. Pero también desde un punto de vista práctico al utilizar un área

representativa de la ciutat, en la qual se modelarà su sistema de abastecimiento, se estimarán sus demandas, se asignarán fugas como coeficientes de emisores y se determinará los volúmenes perdidos.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

La ciutat de Panamá posseïx abundants recursos hídrics a causa del seu clima tropical i contínues precipitacions, posicionant-se com un dels països amb major seguretat hídrica del continent americà. L'abundància del recurs té com a avantatges poder proveir-la a preus econòmics, la facilitat del subministrament, el desenvolupament de les diferents indústries; mentres que el desavantatge són els volums d'aigua perduts per diferents factors com el seu consum excessiu en entorns urbans i industrials, la falta de manteniment de les infraestructures hidràuliques, ús de dispositius de mesurament poc precisos i falta de transparència dels gestors.

No obstant això, la ciutat necessita disminuir la quantitat d'aigua potabilitzada per a enfrontar els futurs desafiaments ambientals que limitaren la captació d'aigua dolça; a més d'assegurar el desenvolupament econòmic i social dels ciutadans.

La present tesi estudia les pèrdues d'aigua potable a la ciutat des dels punts de vista teòric en identificar els punts de millora de la xarxa, utilitzant la informació proporcionada pel proveïment i aproximant els embornals de les perdudes reals i aparents. Però també des d'un punt de vista pràctic en utilitzar una àrea representativa de la ciutat, la qual es modelarà el seu sistema de proveïment, s'estimaran les seues demandes, s'assignaran fugides com a coeficients d'emissors i es determinara els volums perduts.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

Panama City have abundant water resources due to its tropical climate and continuous rainfall, positioning itself as one of the countries with the greatest water security on the American continent. The abundance of the resource has the advantages of being able to supply it at economic prices, the ease of supply, the development of different industries; while the disadvantage is the volumes of water lost due to different factors such as excessive consumption in urban and industrial environments, lack of maintenance of hydraulic infrastructures, use of imprecise measurement devices and lack of transparency of managers.

However, the city needs to reduce the amount of potable water to face future environmental challenges that will limit the collection of fresh water; in addition to ensuring the economic and social development of citizens.

This thesis studies the losses of drinking water in the city from theoretical points of view by identifying the points of improvement of the network, using the information provided by the supply and approximating the sinks of the real and apparent losses. But also, from a practical point of view by using a representative area of the city, which will model its supply system, estimate its demands, assign leaks as emitter coefficients and determine the lost volumes.

Palabras clave español (máximo 5): Recurso, abastecimiento, modelación, pérdidas reales y aparentes.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Recurs, proveïment, modelatge, perdudes reals i aparents.

Palabras clave inglés (máximo 5): Resource, supply, modeling, real and apparent losses.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado y por la fuerza y perseverancia durante los momentos de dificultad. Agradezco a la Universitat Politècnica de València y a su cuerpo docente, por haberme permitido cumplir mi deseo de cursar el Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, por brindarme valiosos conocimientos los cuales aplicaré en mi vida profesional. Agradezco al director Pedro Luis Iglesias Rey, por la oportunidad que me dio de realizar esta tesis como trabajo de graduación. También deseo agradecer a mi director de tesis, el Profesor Ricardo Cobacho Jordán, por haberme brindado su apoyo, guía, paciencia y compartir sus conocimientos en hidráulica durante la elaboración de mi trabajo de graduación. Doy gracias a la profesora Yanet Bethancourt por ser una excelente educadora; mi educación no habría sido la misma sin una persona como ella. Agradezco a mi familia: mis padres, Migdalia y Eric, los principales formadores de mi vida, gracias a su apoyo incondicional, esfuerzos y sacrificios he podido cumplir mis metas. Mis hermanos, Erika y Alberto, quienes han estado conmigo en todo momento y con los que siempre puedo contar. Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN. | 9 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL MANEJO DEL AGUA | 10 |
| 2.1. ANTECEDENTES DE LA CIUDAD | 10 |
| 2.2. ESTADO ACTUAL..... | 11 |
| 2.3 MANEJO Y TRANSPARENCIA DEL GESTOR..... | 13 |
| 2.4. CALIDAD DE DATOS | 14 |
| 3. NORMATIVAS..... | 14 |
| 4. ABASTECIMIENTO | 16 |
| 4.1. DATOS GENERALES | 16 |
| 4.1.2. Climatología..... | 17 |
| 4.1.3. Demografía | 17 |
| 4.1.4. Clientes..... | 18 |
| 4.2. INFRAESTRUCTURA | 18 |
| 4.2.2. Potabilizadoras..... | 20 |
| 4.2.3. Redes de abastecimiento..... | 23 |
| 4.3. USOS DEL AGUA POTABLE..... | 24 |
| 4.3.1. Consumo..... | 24 |
| 4.4. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA POTABLE | 26 |
| 5. BALANCE HÍDRICO | 31 |
| 5.1. DESCRIPCIÓN DEL BALANCE HIDRICO..... | 31 |
| 5.2 RECOLECCIÓN Y ESTIMACIÓN DE DATOS..... | 32 |
| 5.3. BALANCE HÍDRICO DEL AÑO 2022. | 33 |
| 5.4. BALANCE HÍDRICO DE AÑOS ANTERIORES. | 34 |
| 5.5. COMENTARIOS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS BALANCES HÍDRICOS..... | 38 |
| 5.6. CALIDAD DE DATOS DE LOS BALANCES HÍDRICOS..... | 38 |
| 6.FUGAS..... | 39 |
| 6.1 CAUSAS DE LAS FUGAS | 39 |
| 7. ESTUDIO CON INDICADORES | 42 |
| 7.1. DEFINICIÓN DE INDICADORES..... | 42 |
| 7.1.1. Indicadores de porcentaje | 42 |
| 7.1.2. Indicadores relativos | 42 |

| | |
|--|----|
| 7.1.3. Índice de fuga de infraestructura (ILI)..... | 43 |
| 7.4. CÁLCULOS DE INDICADORES | 44 |
| 7.4.1. Cálculo de indicadores de porcentaje | 44 |
| 7.4.2. Cálculo de indicadores relativos | 45 |
| 7.4.3. Cálculo de índice de fugas estructurales | 46 |
| 7.5. COMENTARIOS DE LOS CÁLCULOS..... | 48 |
| 7.5.1. Comentarios cálculos de indicadores de porcentaje..... | 48 |
| 7.5.1. Comentarios sobre los cálculos de indicadores de relativos | 48 |
| 7.5.2 Comentarios de los cálculos del índice de fugas estructurales (ILI) | 48 |
| 7.6. CALIDAD DE DATOS DE LOS INDICADORES | 49 |
| 8. OPTIMIZACIÓN | 50 |
| 8.1. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO..... | 50 |
| 8.1.1. Reemplazo de la tubería | 51 |
| 8.1.2. Reparación..... | 51 |
| 8.1.3. Revestimiento con tubería continua..... | 52 |
| 8.1.4. Mantenimiento | 52 |
| 8.2. CÁLCULOS DE LA OPTIMIZACIÓN | 53 |
| 8.3. CALIDAD DE DATOS DE CALCULOS DE OPTIMIZACIÓN | 57 |
| 9. CONTADORES..... | 57 |
| 9.1. PERDIDAS DE AGUA POR CONTADORES..... | 57 |
| 9.1.1. Errores de medición | 57 |
| 9.1.2. Manipulaciones a los contadores | 58 |
| 9.2. TIPOS DE CONTADORES | 59 |
| 9.3. MANTENIMIENTO DE CONTADORES..... | 60 |
| 9.4. CONTADORES UTILIZADOS EN PANAMÁ..... | 61 |
| 9.5. CONTADORES RECOMENDADOS EN PANAMÁ SEGÚN EL SECTOR | 63 |
| 9.6. CALCULOS DE LA GESTIÓN DE CONTADORES EN PANAMÁ..... | 63 |
| 9.6.1. Tiempo de reemplazo de contadores | 63 |
| 9.7. CALIDAD DE LOS DATOS REQUERIDOS PARA LOS CALCULOS DE LA GESTIÓN DE CONTADORES | 69 |
| 10. MODELADO DE LA RED DE UNA ZONA URBANA | 70 |
| 10.2. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA | 71 |
| 10.2.1. Trazado de tuberías y ubicación de nudos | 71 |

| | |
|--|-----|
| 10.2.2. Determinación de demandas | 72 |
| 10.2.3. Asignación de patrón de consumo | 75 |
| 10.2.4. Posicionamiento de embalses | 75 |
| 10.2.5. Adición de fugas a la red | 76 |
| 10.2.6. Estudio de roturas en la red | 78 |
| 10.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA RED..... | 78 |
| 10.3.1. Estudio de velocidades | 78 |
| 10.3.2. Diagnóstico de las fugas de la red..... | 82 |
| 10.3.3. Balance de caudales de la red | 82 |
| 10.3.4. Mapa de presiones | 83 |
| 10.3.5 Calidad de los datos requeridos para la modelación del sistema potable de la ciudad de panamá | 83 |
| 11. RESUMEN DE LA CALIDAD DE LOS DATOS EN CADA APARTADO | 84 |
| 12. CONCLUSIONES..... | 85 |
| 13. REFERENCIAS | 87 |
| 13.1. FIGURAS | 87 |
| 13.2. GRÁFICOS | 90 |
| 13.3. TABLAS | 91 |
| 13.4. ÍNDICE DE ECUACIONES | 94 |
| 14. ANEXOS | 103 |

1. INTRODUCCIÓN.

El agua dulce es primordial para la vida de innumerables especies. Es necesaria para su consumo, el saneamiento, la industria, sectores agrícolas, ganaderos y para disponer y mantener ecosistemas y sus cadenas tróficas. En la Ingeniería Civil, en cualquier proyecto de construcción comercial residencial o industrial, una de las prioridades es la correcta instalación y funcionamiento de sistemas de distribución de agua potable, con el fin de distribuir, transportar y suministrar agua desde potabilizadoras, embalses o acueductos a los abonados.

La capacidad de distribución de agua potabilizada por parte de los servicios públicos de la ciudad de Panamá es un elemento fundamental para el bienestar y progreso socioeconómico en temas de importancia como la salud, el medio ambiente, industria, agricultura y ganadería. Se ha demostrado con estadísticas la relación directa entre la eficiencia del sistema de distribución de agua potable con calidad de salud pública, utilizando ciertos indicadores como la baja del porcentaje de defunciones por enfermedades estomacales.

La ciudad se enfrenta a diversos desafíos debido a la sobreexplotación del recurso, el crecimiento poblacional, la inadecuada medición del consumo, los costos de la energía eléctrica y fallas de operación como son las fisuras y roturas en tuberías. Para abordar éstas problemáticas sería importante implementar estrategias de conservación, mejorar la infraestructura y promover el uso responsable de los recursos.

El agua potabilizada tiene un costo considerable si se contempla su extracción, purificación y su transponerte a los abonados y con los años estos costes crecerán ya que el agua dulce se vuelve más escasa y se requieren de nuevos métodos y tecnologías para obtenerla; por eso surge la importancia de que no se pierda este recurso. Las fugas de agua no solo afectan en cantidad sino también en calidad, ya que al despresurizarse las tuberías cabe la posibilidad que se den la entrada de contaminantes los cuales puedan comprometer la salud de los clientes. Otro factor a considerar es que el agua fugada en los suelos puede provocar daños considerables a los cimientos de las calles, aceras, y edificios. Estos problemas causados en las infraestructuras pueden acusar de irresponsables a los encargados de la instalación de las líneas potables, conllevando con ello disputas legales y financieras.

Para lograr el máximo provecho del sistema es indispensable prevenir, detectar y arreglar estas fugas para garantizar un servicio de cantidad y calidad, además de retardar la ejecución de ampliaciones y complementos a las redes hasta que verdaderamente sean necesarios.

2. DESCRIPCIÓN DEL MANEJO DEL AGUA

2.1. ANTECEDENTES DE LA CIUDAD

Antes de la instalación de las líneas de abastecimiento de agua potable, esta se recolectaba de los ríos y las lluvias, con ayuda de los tejados, para ser almacenada en barriles, los cuales eran foco de enfermedades y plagas; ya que estas aguas arrastraban una gran cantidad de sólidos y materia orgánica la cual es perjudicial para la salud humana. En aquella época era común la profesión de comerciantes de agua, los cuales la vendían con la promesa de que era agua limpia y sin enfermedades. Sin embargo, ellos recolectaban el agua con los mismos métodos ya mencionados por lo que presentaban los mismos problemas. También existía el reto en que en el verano disminuían las precipitaciones y bajaban los niveles de los ríos, lo que conllevaba a sequías que encarecían el precio del agua.

El primer sistema de distribución de agua potable en la ciudad de Panamá se instaló en 1905, este fue realizado por el gobierno de Estados Unidos mientras se realizaba la construcción del Canal de Panamá.

La ciudad poseía un sistema anticuado de transporte de agua. Ciudades cercanas como Bogotá (Colombia) y San José (Costa Rica) tenían sistemas de distribución de agua desde el siglo XVIII y XIX respectivamente.

El sistema de distribución fue administrado por los estadounidenses hasta 1942, cuando se realizó un tratado para traspasarlo a las autoridades panameñas. En 1953 también fue entregado los sistemas de potabilización, en concreto la planta potabilizadora de Miraflores.

Tras este suceso se fundó la primera entidad especializada en los sistemas potables y sanitarios llamada Comisión de Acueductos y Alcantarillados de Panamá (C.A.A.P.). La principal potabilizadora del país es la Federico Guardia Conte (Chilibre), esta fue construida en 1975 debida al gran aumento poblacional y a la mayor demanda de agua potable por parte de la ciudadanía, actualmente está potabiliza a 0.473 hm³ al día.

La actual entidad encargada de gestionar la potabilización, distribución y recolección de las aguas fue formalizada el 29 de diciembre de 1961 mediante la ley 98. Esta fue renombrada como Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN). Durante su fundación hasta el año 1982 fue administrada por el estado para luego ser privatizada por los problemas económicos y las bajas tarifas. La gestión por parte del sector privado duraría hasta 1999 para nuevamente ser una institución pública, esto con el objetivo de mejorar las infraestructuras y la prestación del servicio. Desde aquel año hasta la actualidad la institución se ha enfocado en la expansión de las líneas potables desde las zonas urbanas hasta las rurales y la reparación de fugas; además de la construcción de nuevas potabilizadoras, contando con 56 actualmente en funcionamiento.

Sin embargo, esta institución no velaba por la protección de los recursos hídricos, por ello se creó la Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá de 23 de noviembre de 2006, por medio de la ley 44. Hasta la actualidad dicha autoridad se encarga de gestionar el uso sostenible de las cuencas para el desarrollo social y económico.

Por su localización geográfica y clima tropical, es reconocido como uno de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos, el Centro del Agua para América Latina y el Caribe

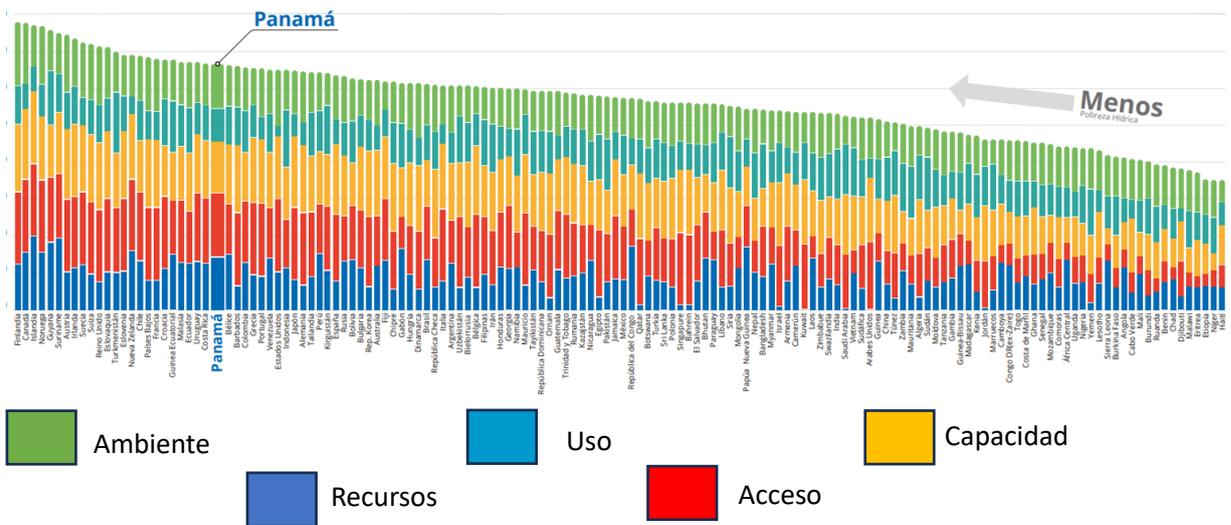
(CATHALAC) realizó un análisis en 2011 donde destacó que en dicho año poseía un patrimonio de más de 200.000 hm³ de agua bruta.

2.2. ESTADO ACTUAL.

Panamá posee abundantes fuentes de agua dulce con alrededor de 500 ríos y 2900 eventos de precipitaciones por año de los cuales se beneficia la ciudad, sumando una cantidad de agua cruda de 29 m³ per cápita al año. Las precipitaciones a lo largo del año se estiman en 3000 milímetros al año, lo cual es una cifra significativa comparándola por ejemplo con la Comunidad Valenciana teniendo un promedio de 400 milímetros al año.

En un ranquin realizado por la universidad de de Keel (Reino Unido) con el índice de pobreza de agua (IPA), comparándolo con 142 países, Panamá tiene el puesto 25 con menor pobreza hídrica, esto da una idea general de la cantidad de recurso hídrico que tiene a disposición la ciudad de Panamá (Gráfico 1). Entre los parámetros valorados están: la disponibilidad del recurso, la facilidad al acceso del agua, la capacidad de gestión, el uso en distintos sectores (agrícola, industrial, ambiental y urbano) y la integridad del medio ambiente. Cada parámetro fue valorizado con un puntaje mínimo de 1 y un máximo de 20.

Gráfico 1: Índice de pobreza de agua (IPA) en 142 países. (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016)



Por ello, el país no debería presentar problemas en el abastecimiento del agua potable; sin embargo, actualmente se presentan distintas dificultades en el tema. Entre estas, está la escasez que genera un estrés hídrico, conllevando a sequías producidas por el Fenómeno de “El Niño”. Este fenómeno climático producido en verano es un incremento de la temperatura inusual en las aguas y una disminución las precipitaciones en el área tropical oriental ecuatorial del Océano Pacífico

En la economía panameña, el agua es uno de los pilares fundamentales para su desarrollo, en especial del Lago Gatún ya que este no solo es utilizado para captar agua bruta para las demandas urbanas y agrícolas sino también por su uso en el tránsito de buques de carga en el Canal de Panamá. Sin embargo, en agosto de 2023, los lagos que abastecen el canal han bajado

Este coste es mucho menor comparado con la tarifa mínima de Valencia que es de 0.86 dólares/m³ (extraído de la tabla de tarifas del bastecimiento “Aguas de Valencia”) y con el del promedio de los países latinoamericanos que es de 0.44 dólares/m³.

El consumo del agua es uno de los más elevados de la región, en el año 2020 se estimó que el consumo facturado por persona al día era de 0.387 m³, pero un estudio más reciente del abastecimiento realizado en marzo de 2023 revelo que actualmente se estima en 0.507 m³ (del estudio del Programa de Saneamiento de la Ciudad y de la Bahía de Panamá) mientras que el promedio de los países cercanos es de 0.144 m³, a nivel mundial es de 0.189 m³ y a la recomendada por la OMS (Organización Mundial de la Salud), quienes estiman un consumo mínimo de agua, por persona/día de unos 0.050 m³ (cabe resaltar que este es el mínimo de subsistencia de una persona). Esto refleja que se demanda más del doble o el triple de agua que realmente se requiere. Es evidente que hay un consumo descontrolado de agua potable, por lo que es necesario que la población tenga mayor conocimiento y conciencia del valor del agua y de las consecuencias del despilfarro. La ASEP (Asociación de Servicios Públicos) ha informado que, en la ciudad, los sectores con mayores índices de consumo en Calidonia, Chorrillo y Barraza.

2.3 MANEJO Y TRANSPARENCIA DEL GESTOR.

Según datos del año 2022 del IDAAN, en las épocas secas se da una mayor demanda urbana, eso se ve reflejado también en la disminución de los niveles del principal lago del país llamado Alajuela, que es de donde se toma el agua cruda. La institución preserva el agua de ciertos ríos a ciertos niveles como medida secundaria en caso de que la extracción del lago mencionado sea inestable; sin embargo, esta no es una solución sostenible a lo largo del tiempo. Este alto consumo puede ser producto de las bajas tarifas del agua potable las cuales no han tenido un aumento importante desde 1980, la falta de concientización por parte de los abonados hacia la importancia de los recursos hídricos del país.

Otro impacto de las bajas tarifas son la falta de fondos para realizar inspecciones, mantenimiento, reparaciones, reemplazos y progresos en las líneas potables. Actualmente no se encuentra en planificación algún cambio en la tarificación el cual incentive a optimar el uso del agua, concientizar sobre el valor del recurso, además de tener costes que permitan amortiguar todos los trabajos de mantenimiento, expiación y corrección de las deficiencias de los sistemas de potabilización, distribución y saneamiento. Desafortunadamente actualmente se registran altos números de morosidad, aproximadamente 250,000 abonados no poseen sus pagos al corriente con un promedio de 18 meses de atraso. En el último estudio de rentabilidad realizado por el IDAAN en el 2021, ha publicado que es de un porcentaje de -135%; lo que quiere decir que se invierte más del doble del dinero que del que se recupera, incapacitando así nuevas inversiones para costear nuevas potabilizadoras en lugares sin el servicio, la expansión de las líneas potables y la renovación de las infraestructuras.

Esto sumado a que la organización tarifaria no promueve el ahorro del recurso, ya que en ciertos sectores urbanos no cuentan con medidor por lo que reciben una tarifa fija la cual no refleja consumo exacto, lo cual da lugar a que esos abonados consuman más de lo debido. Las altas pérdidas de agua por errores de medición se deben a la falta de instalación de contadores en hogares, en la ciudad de Panamá se estima que son más de 2,700 abonados.

2.4. CALIDAD DE DATOS

El análisis de la calidad de datos trata de una evaluación del desempeño de aspectos definidos, como la exactitud, fiabilidad, coherencia, completitud, accesibilidad y vigencia. Este estudio de datos puede ser significativo para el manejo del sistema, donde utilizar datos pocos exactos puede conllevar a desperfectos técnicos o administrativos.

En la presente tesis, la evaluación de los datos se basará en corroboración de constancia de valores para encontrar números atípicos, evaluar si se encuentran dentro de lo esperable utilizando métricas, metadatos u otros estudios semejantes, destacar los aspectos a mejorar, procesos de recolección adecuados e identificación de manipulaciones.

Se optó utilizar una evaluación utilizando un número de estrellas donde la cantidad de estas representará una definición:

Tabla 2: Características según la clasificación de la banda de calidad de datos.

| Banda de calidad de datos | Características |
|---------------------------|--|
| ★★★ | Calidad buena: Datos con gran fiabilidad, recolección acorde al dato, dentro del rango esperable, actualizados a la fecha, |
| ★★ | Calidad regular: incertidumbre en la fiabilidad, toma del dato de forma cuestionable, desviación del dato esperable y antigüedad de menos de 5 años. |
| ★ | Calidad mala: Datos con poca fiabilidad, toma del dato inadecuada, fuera del rango esperable, antigüedad de más de 5 años. |

En los apartados que lo ameriten (dependiendo de la relevancia de este) se asignará una clasificación general según la cantidad de características que cumpla.

3. NORMATIVAS

La principal normativa para el diseño de redes potables en la ciudad de Panamá es “NORMAS TÉCNICAS PARA APROBACIÓN DE PLANOS DE LOS SISTEMAS DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS” donde su última modificación fue realizada en 2006. Dicho documento solo dispone de 3 normas sobre la presentación de los planos a las autoridades y 17 normas de obligado cumplimiento obligatorio concerniente a el diseño e instalación de sistemas potables, las cuales su contenido consta de 750 palabras. También adiciona un documento llamado “Manual de buenas prácticas constructivas” el cual es un compendio de las normas americanas propuestas, pero estas no son de obligado cumplimiento.

Mientras si este se compara con normativas españolas como por ejemplo “NORMAS PARA REDES DE ABASTECIMIENTO” del Canal Isabel II, el cual consta de palabras de 3,195 palabras y su última actualización fue en el año 2021; o con el “REGLAMENTO DEL SERVICIO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE VALENCIA.” de Valencia el cual tiene 26,240 palabras y su última actualización fue en el año 2015.

Por lo que claramente es evidente que las normas panameñas además de desactualizadas, requieren ser reforzadas con mayor contenido para asegurar un correcto diseño, instalación y funcionamiento de las tuberías, bombas y accesorios.

Entre los aspectos más destacables están:

- Normas para garantizar la potabilidad del agua.
- Obligación de inspecciones, mantenimiento y reparaciones.
- Hacer pública la información con respecto a los cortes de suministro.
- Descripción a detalle sobre las instalaciones de tubos, bombas y accesorios en líneas principales, acometidas e interiores.
- Reglamentación y prohibiciones a los abonados.
- Obligaciones y prohibiciones a los abonados.
- Toma de las medidas prudentes para no afectar el buen funcionamiento de una red existente en el caso de ampliarla o conectar otras redes.
- Especificación de la adecuada instalación de sistemas contra incendios junto con sus elementos.
- Contemplar el uso de otros tipos contadores además de los volumétricos, junto con la comprobación de su adecuado funcionamiento.
- Dependiendo del tipo de contador, adicionar una política de sustitución a estos al cumplir con su tiempo de vida útil.
- Mayor rigidez en las presiones mínimas de suministro.
- Adicionar regulaciones sobre el almacenaje de agua.
- Sanciones ante fraudes de suministro.

4. ABASTECIMIENTO

4.1. DATOS GENERALES

4.1.1. Planos generales

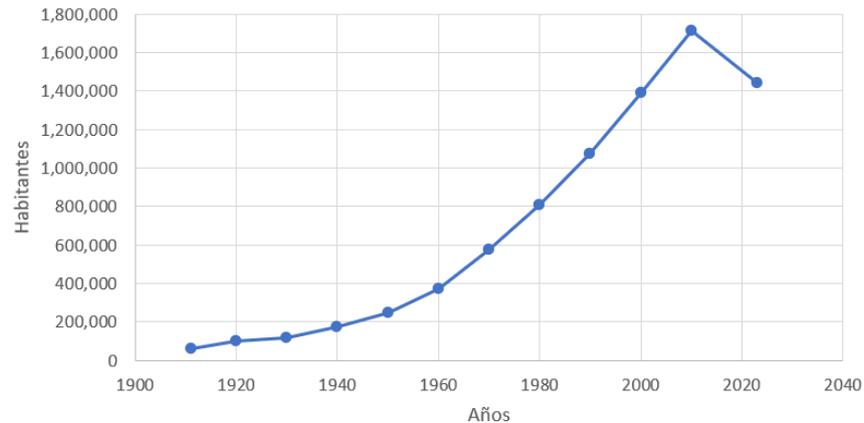
Figura 1: Ubicación geográfica de Panamá. (Mapamundial.co 2015).



Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Panamá. (Milenioscuro,2013).



Gráfico 2: Evolución de los habitantes de la ciudad de Panamá. (Contraloría General de la República, Censos década 2020).



Se puede observar un descenso significativo de la población en la ciudad entre el año 2010 y 2023, esto es debido a que en el año del 2014 hubo una reestructuración de la división política donde una parte de la ciudad de Panamá se convirtió en una provincia distinta (Panamá Oeste).

4.1.4. Clientes

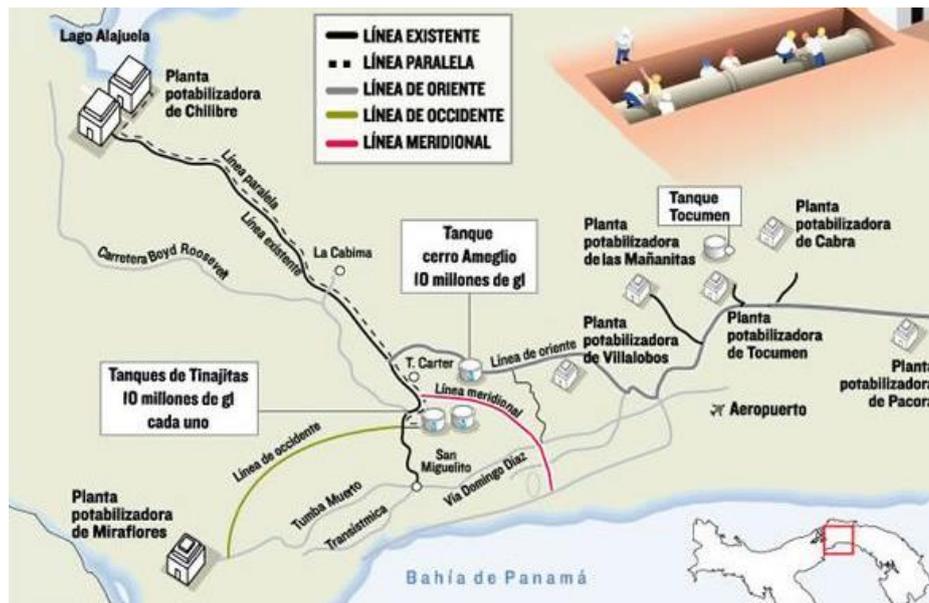
Se estima que en el país el 94.4% de las viviendas tienen disponible el acceso a los servicios de agua potable (según el censo nacional del 2020). Pero este porcentaje no es representativo de todas las áreas ya que se estima que en la zona urbana de la ciudad de Panamá la disponibilidad a este es de un 98.1% mientras que en las zonas urbanas es de 84.3%.

Panamá tiene una población de 4.35 millones de habitantes, pero alrededor de 600,000 personas, no poseen servicio de distribución de agua potable principalmente por falta de infraestructura, entre estas solo 30,000 son abastecidas con ayuda de camiones cisterna. Mientras que 800,000 disponen del servicio interrumpido a ciertas horas del día, 270,000 no tienen el servicio por diversas razones

4.2. INFRAESTRUCTURA

En el siguiente mapa se muestra las potabilizadoras y principales estructuras hidráulicas que operan para abastecer la ciudad, cabe resaltar que actualmente se encuentran fuera de operación las potabilizadoras de Tocumen, Las Mañanitas y de Villa lobos.

Figura 4: Mapa de las infraestructuras principales de la ciudad de Panamá. (Instituto de Acueductos y Alcantarillados nacionales, 2019).



4.2.1. Captaciones

El recurso hídrico utilizado extraído para abastecer a la ciudad de Panamá es exclusivamente de cuerpos de agua superficiales, ya que es la forma más rápida y sencilla de su obtención, además de que los ríos y lagos poseen suficientes volúmenes para no recurrir a las aguas subterráneas.

Las captaciones de agua bruta para el abastecimiento de la ciudad de Panamá son:

Lago Alajuela: Se encuentra ubicado entre las provincias de Panamá y Colón, tiene una superficie de 50 km², antiguamente llamado lago Madden, este es un lago artificial el cual se formó en el año 1935, utilizando una derivación el río Chagres. Las razones de su creación fueron de resguardar el recurso hídrico para evitar una baja del calado del lago Gatún (el cual abastece al canal de Panamá) y de facilitar la extracción del agua bruta para su posterior potabilización.

Río Pacora: Ubicado en la provincia de Panamá, específicamente en el área de Pacora, su cuenca hidrográfica abarca un área de 367.53 km², de longitud tiene una distancia de 48 km, se encuentra protegido al ser categorizado como una reserva ecológica y turística desde 2020. Este se forma desde el corregimiento de San Martín, en las montañas Altos de Pacora, Cerro Azul y Cerro Jefe y se deriva en las Montañuelas de Tapagra.

Lago Miraflores: Es un lago artificial de un área de 3.94 kilómetros. Dependiendo de la estación se estima que tiene una capacidad de almacenamiento entre 2.5 a 19 millones de metros cúbicos de agua. Donde sus trabajos de su creación iniciaron el primero de octubre de 1913 utilizando los ríos Caimitillo, Dominica, Grande, Pedro Miguel, Cocolí y Camarón, ubicando represas para su derivación. Su formación tiene como objetivo principal abastecer al Canal de Panamá y como función secundaria, suministrar las demandas de agua de la ciudad de Panamá para potabilización.

Río Cabra: Pertenece a la cuenca del río Juan Díaz, se encuentra localizado en el sector este de la Ciudad de Panamá, nace a los 600 metros de del nivel del mar siendo alimentado por el río Cabuya, tiene una distancia de 30 km y se estima que posee un caudal promedio de 0.343 m³/s. Este desemboca en humedales los cuales fueron designados zonas inundables. Su principal uso es cubrir las demandas urbanas de las zonas cercanas a este río.

4.2.2. Potabilizadoras

El agua potable de la ciudad de Panamá es abastecida mediante seis plantas potabilizadoras, estas son:

Federico Guardia Conte (Chilibre 1):

Tabla 3: Datos de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 1).

Figura 5: Planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 1).

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Capacidad (MGal/día) | 104.27 |
| Tipo de sistema | Convencional |
| Fuente | Lago Alajuela |
| Elevación | 89 |
| Estado | En operación |
| Administración | IDAAN |
| Población a la que abastece | 635,366 |
| Año de construcción | 1974 |



Federico Guardia Conte (CHILIBRE 2):

Tabla 4: Datos de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 2).

Figura 6: Planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 2).

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Capacidad (MGal/día) | 114.17 |
| Tipo de sistema | Convencional |
| Fuente | Lago Alajuela |
| Elevación | 86 |
| Estado | en operación |
| Administración | IDAAN |
| Población a la que abastece | 704,276 |
| Año de construcción | 2008 |



Pacora:

Tabla 5: Datos de la planta potabilizadora Pacora.

Figura 7: Planta potabilizadora Pacora.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Capacidad (Mgal/día) | 8.52 |
| Tipo de tratamiento | Convencional |
| Fuente | Río Pacora |
| Elevación | 21 |
| Estado | En operación |
| Administración | IDAAN |
| Población a la que abastece | 48,048 |
| Año de construcción | 2004 |



Miraflores:

Tabla 6: Datos de la planta potabilizadora Miraflores.

Figura 8: Planta potabilizadora Miraflores.

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| Capacidad (MGal/día) | 44,98 |
| Tipo de sistema | Convencional |
| Fuente | Lago Miraflores |
| Elevación | 60 |
| Estado | En operación |
| Administración | ACP |
| Población a la que abastece | 200,000 |
| Año de construcción | 1915 |



Cabra 1:

Tabla 7: Datos de la planta potabilizadora Cabra 1.

Figura 9: Planta potabilizadora Cabra 1.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Capacidad (MGal/día) | 1.84 |
| Tipo de sistema | Convencional |
| Fuente | Río Cabra |
| Elevación | 201 |
| Estado | EN OPERACIÓN |
| Administración | IDAAN |
| Población a la que abastece | 14,420 |
| Año de construcción | 1989 |



Cabra 2:

Tabla 8: Datos de la planta potabilizadora Cabra 2.

Figura 10: Planta potabilizadora Cabra 2.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Capacidad (MGal/día) | 3.67 |
| Tipo de sistema | Convencional |
| Fuente | Río Cabra |
| Elevación | 194 |
| Estado | En operación |
| Administración | IDAAN |
| Población a la que abastece | 28,763 |
| Año de construcción | 2001 |



4.2.3. Redes de abastecimiento

Las redes de distribución de agua potable de la ciudad de Panamá, según los datos más recientes del año 2022:

Tabla 9: Datos del abastecimiento de la ciudad de Panamá.

| | |
|--------------------|-----------|
| Longitud de la red | 3,068 km |
| Presión media | 35 m.c.a. |

El sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Panamá posee tuberías antiguas de hierro fundido las cuales superan los cincuenta años de edad (principalmente en el área de Calidonia Casco Antiguo y Bella Vista). Estas líneas además del deterioro por el paso del tiempo y la corrosión, son sometidas a presiones mayores de las que fueron previstas por el aumento de la población; también el diámetro interno de estas no es suficiente para cumplir con la demanda.

Esta situación es preocupante ya que debido a la suma de años que poseen, el no sustituir las líneas potables conllevaría a provocar perjuicios a la salud de la población, ya que existe la posibilidad de que por las grietas entren sólidos con bacterias cuando se despresurizan las tuberías. También la corrosión de las tuberías metálicas de plomo y cobre afecta la calidad del agua ya que la acidifica, provocando enfermedades neurológicas, gastrointestinales, en los sistemas reproductivos y hasta una la muerte por intoxicación. Entre las más destacadas está el cólera y hepatitis.

El transporte del agua en las líneas a lo largo de los años puede provocar fisuras y rupturas que derivan en pérdidas del recurso. Esto se debe al uso continuo y a las altas presiones utilizada en estos sistemas, provocando debilitaciones en las juntas, accesorios y las paredes de la tubería. En el año 2020 al mes el Instituto De Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) recibió alrededor de 120 reportes, al mes, de fugas en la ciudad de Panamá y 500 en todo el país, esto sin sumar 800 fugas en tuberías localizadas, que según la institución estas son las que por diferentes situaciones no pueden ser reparadas.

Adicional a esto, la ciudad se encuentra en constante crecimiento y las tuberías principales de distribución no han tenido cambios en su diámetro. Debido al incremento del caudal, las presiones disminuyen, por lo que en ciertos puntos de consumo no cumple con la presión mínima de demanda; por lo que el abastecimiento requiere un incremento del bombeo general de la red, a su vez generando áreas con presiones excesivas y un aumento de fugas.

Desde el 2020 el IDAAN inició un programa de detección de fugas mediante cámaras operadas de forma manual y automática, estas pueden operar en tuberías con un diámetro mayor a 4 pulgadas. Esta al conectarla a un ordenador permite ver las imágenes del interior del sistema para que la falla sea localizada y según las dimensiones de esta sea reparada.

Según avisos realizados por el IDAAN junto con un artículo realizado por Programa de Saneamiento de la Bahía de la Ciudad de Panamá, estimo que el porcentaje del agua no facturada es de alrededor de un 43.2%, de las cuales 27.1% son perdidas reales y 16.1% son perdidas aparentes.

Este porcentaje de pérdidas estimado refleja los problemas que presentan las infraestructuras potables de la ciudad y de la medición del consumo, el cual es considerablemente mayor a los porcentajes promedios de los países en desarrollo el cual es un 23%.

Se han realizado comunicados por parte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), donde menciona que estas pérdidas del recurso son muy elevadas. El principal causante de esta problemática es el deterioro y falta de mantenimiento al sistema de distribución potable. Para ejemplificar con mayor exactitud la cantidad de agua desperdiciada que se potabiliza en el país, no se facturó 191.28 millones de m³ en el 2022 según la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) la cual es la entidad reguladora del IDAAN.

4.3. USOS DEL AGUA POTABLE

4.3.1. Consumo

Tabla 10: Datos del abastecimiento de la Ciudad de Panamá. (Instituto de Acueductos y Alcantarillados).

| | | |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Volumen inyectado | 367.7 millones de m ³ | 97,145 millones de galones |
| Volumen consumido | 325.5 millones de m ³ | 86,002 millones de galones |

El Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) ha categorizado los usos del agua potable en cuatro sectores: urbano, industrial, comercial y gubernamental. Lamentablemente estos datos no han sido actualizados desde el año 2018, pero utilizando estos se calculó el porcentaje de su uso y se estimó el volumen de uso promedio entre los años 2018 hasta 2022.

Gráfico 3: Uso del agua potable en la ciudad de Panamá en porcentaje/año. (Autoridad nacional de los servicios públicos, 2016).

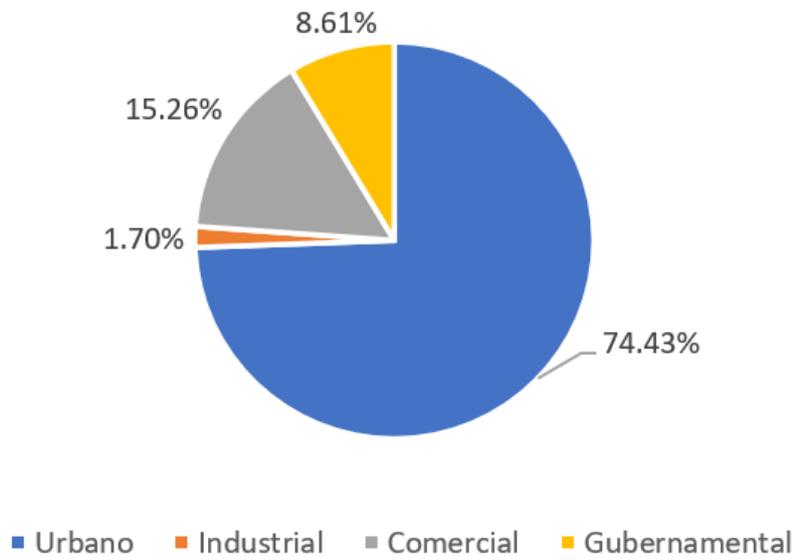
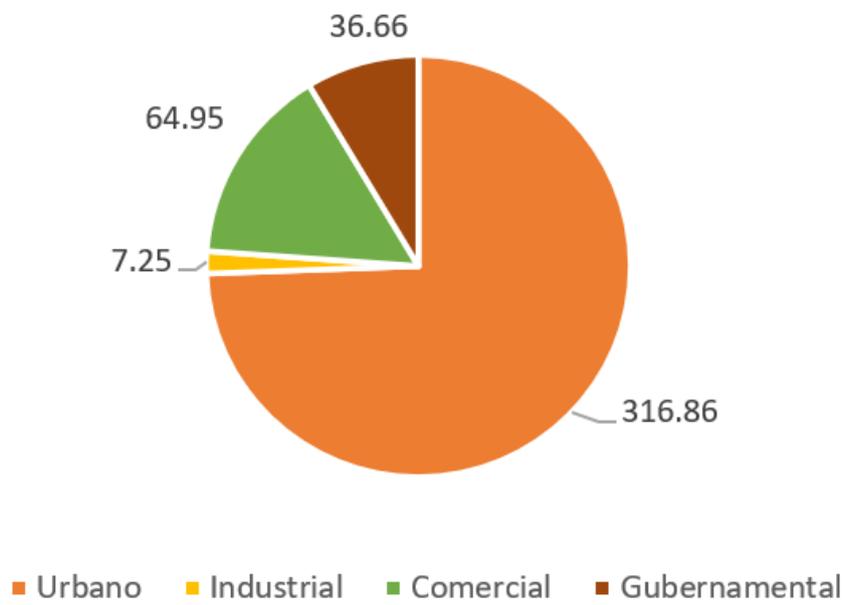


Gráfico 4: Estimación del uso del agua potable en la ciudad de Panamá en millones de m³/año. (Autoridad nacional de los servicios públicos, 2016).



4.4. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA POTABLE

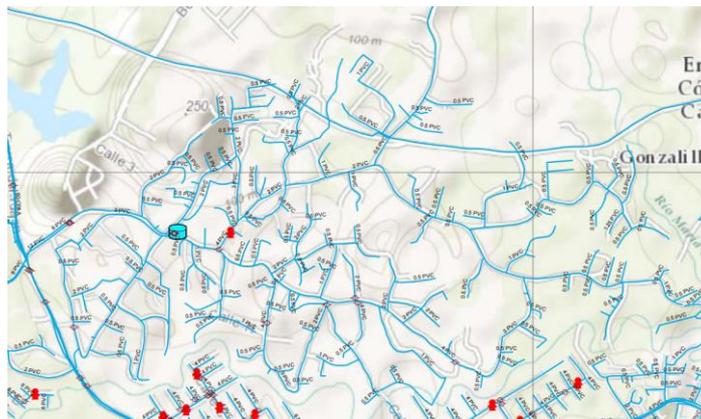
Las redes de distribución de agua son sistemas de gran importancia en la sociedad y de considerable complejidad en su planificación y diseño, para certificar el funcionamiento y confiabilidad del servicio en calidad y cantidad.

Estas deben de ser diseñadas con cierta incertidumbre sobre su evolución a futuro como el aumento poblacional o las variaciones del consumo para que con los años el servicio no se insuficiente a las demandas.

Aspectos a mejorar del diseño y planificación de la red de abastecimiento de agua potable de Panamá

- No existe distinción o planos a detalle donde se aprecie si las tuberías están colocadas en la calle o las aceras.
- Falta de actualización de planos desde el año 2017.
- No proporciona información sobre las estaciones de bombeo, diámetro de hidrantes, volumen y altura de depósitos.
- Falta de trazado de tuberías de forma mallada, dando lugar a cortes de agua masivos en el caso de trabajos de reparación o mantenimiento.

Figura 11: Planos de línea potable del distrito de 24 de diciembre.



- En los viales de más de 15 m de ancho no se instalan dos tuberías a cada lado del vial, generando acometidas muy extensas y mayores costes en infraestructuras.

Figura 12: Planos de línea potable del distrito de 24 de San Francisco



- La red posee tuberías sin salidas, esto no es recomendable ya que por motivos estructurales genera una gran pérdida de carga y por consecuencia un diámetro de tubería mayor y son más vulnerables por el incremento de presión de los golpes de ariete. También podrían perjudicar la calidad del agua por la sedimentación de sólidos arrastrados y dar paso a la proliferación de bacterias.

Figura 13: Planos de línea potable del distrito de Bethania

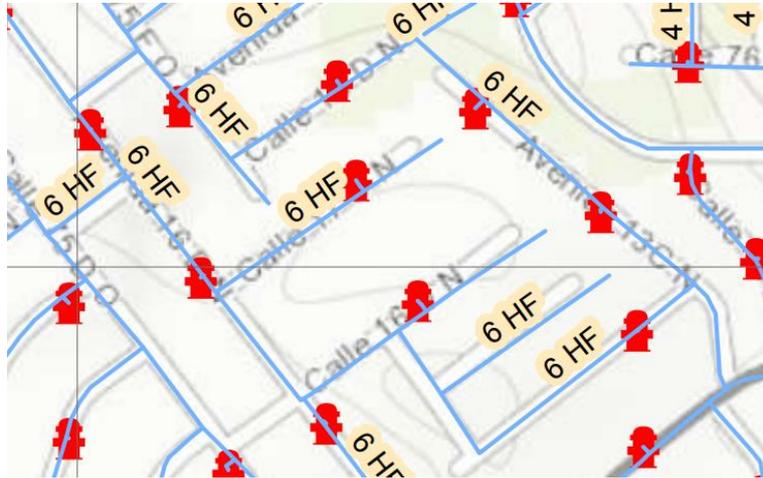
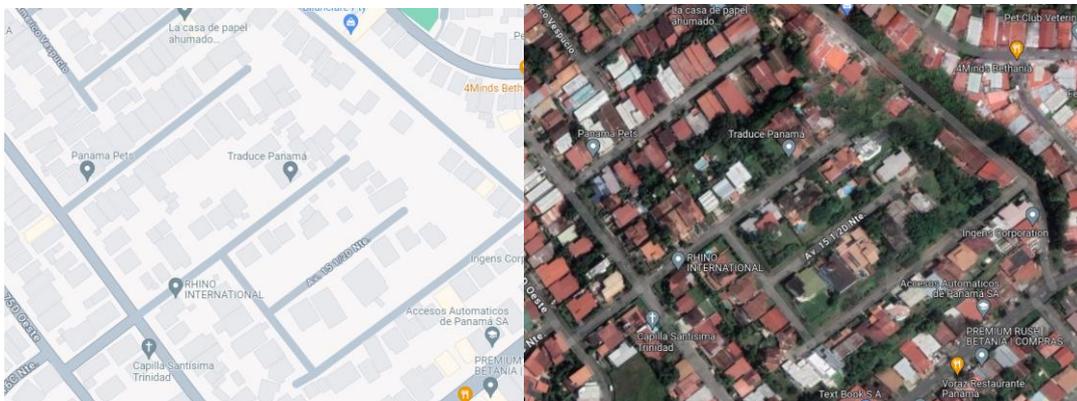
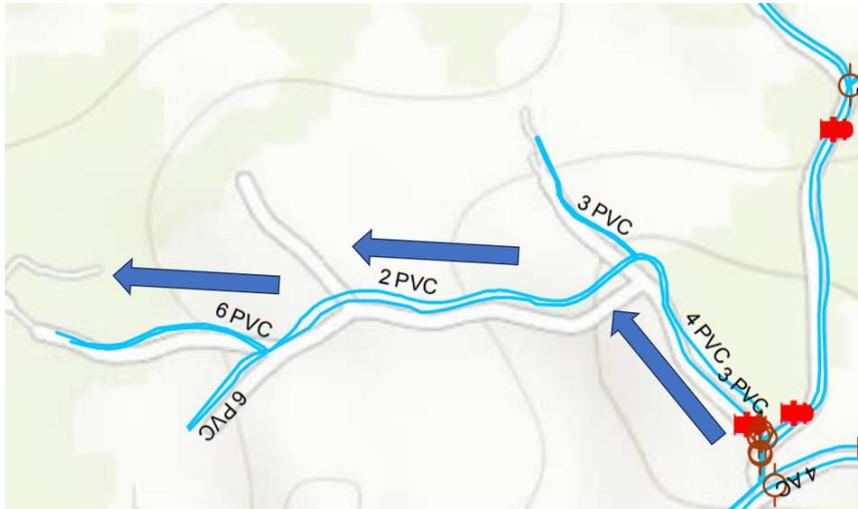


Figura 14: Vista con satélite de un sector del distrito de Bethania.



- En ciertas secciones, los diámetros de las tuberías incrementan en dirección al flujo del agua, lo cual va en contra de los criterios de diseño de redes de suministro.

Figura 15: Planos de línea potable del distrito de 24 de diciembre.

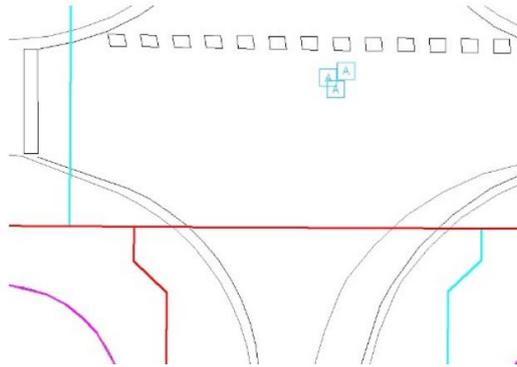


- Los constantes usos de uniones en cruz, estos accesorios son costosos y deberían ser utilizados solo por motivos de falta de espacio. Económicamente es más rentable utilizar dos uniones en T.

Figura 16: Planos de línea potable del corregimiento de San Francisco.

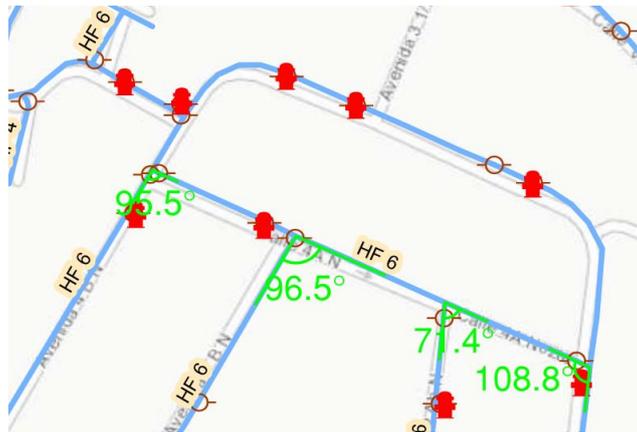


Figura 17: Ejemplo de diseño donde se evita utilizar uniones en cruz.



- Diseño con tuberías de hierro fundido con ángulos de giro de tuberías donde no existe accesorios comerciales que lo hagan posible, los accesorios de giro comerciales de estas tuberías son de 30° , 45° y 90° .

Figura 18: Planos de línea potable del corregimiento de Bella Vista.



- Espaciamiento de hidrantes con longitudes mayores a 200m, esto podría dificultar las labores de apagados de incendios, esta es una distancia que recomiendan distintas normas internacionales como la del Canal Isabel II (Madrid).

Figura 19: Planos de línea potable del corregimiento de Juan Díaz.



- Se pudo haber evitado que las líneas de agua potable pase por los carriles de las glorietas, ya que, en caso de trabajos de mantenimiento o reparaciones, se generaría grandes problemas de tráfico.

Figura 20: Planos de línea potable del corregimiento de San Francisco.



4.4.1. Calidad de datos de los planos de redes potables

A los planos de las redes potables de la ciudad de Panamá, se asignó una clasificación de baja calidad de datos (★). Esto debido a que su última actualización fue en el año 2017 (hace 7 años), ciertos tramos de tuberías resultan difíciles de comprender al ser trazados tan cerca unos de otros y existe poca fiabilidad de los datos a que los a trazados que incumplen las normas de la ciudad y la limitación de los materiales.

5. BALANCE HÍDRICO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Una de las mayores problemáticas que enfrentan los abastecimientos es controlar los altos niveles de agua no facturada, también de que muchos de los prestadores del servicio subestiman o no determinan correctamente los volúmenes de agua no contabilizada mientras que este es un indicador fundamental para evaluar la eficiencia de un sistema. Por ello ha surgido la necesidad de realizar balances hidráulicos para obtener una perspectiva más clara de los sistemas.

El balance hídrico se define como el recuento de las fuentes y sumideros de un sistema determinado. Es necesario realizar el equilibrio de una red para impedir un exceso de suministro o un insuficiente abastecimiento.

En el año 2000 la International Water Association (IWA) publicó la metodología del balance hídrico, donde estandarizó los componentes de éste, orientado a obtener y examinar las pérdidas reales y aparentes desde la inyección a los sistemas de abastecimiento de agua hasta la entrega a los abonados, o sea, a determinar las pérdidas antes de los contadores de los clientes. Actualmente es aplicado y reconocido mundialmente por reguladores, empresas privadas, gestores de servicios gubernamentales y organizaciones técnicas. Obtener este balance también permite calcular ciertos indicadores, para evaluar el desempeño del servicio.

Se considera que la metodología de la IWA es la mejor sistemática para el análisis de pérdidas y agua no contabilizada, pero es imprescindible que esta esté basada en los caudales dados por mediciones. La dificultad de aplicar esta metodología es que no todos los abastecimientos cuentan con medidores de caudal a la entrada de los abonados, donde sus facturas mensuales se establecen con estimaciones del agua demandada, por lo que la base de datos a utilizar no es confiable. Es relevante que los datos recopilados sean lo más precisos posibles, ya que la introducción errónea de estos creará resultados aún menos acertados, creando una visión completamente distinta a la realidad.

Esta metodología contiene los siguientes componentes:

- Inyección total de la red: es el volumen anual de entrada a esa parte del sistema de suministro de agua.
- Consumo autorizado: es el volumen anual de agua medida y no medida que toman los abonados registrados, pero no necesariamente estos volúmenes son facturados ya que también suministran a hidrantes contra incendios y entidades gubernamentales.
- Pérdidas totales: es la resta entre el volumen de inyección total de la red y el volumen autorizado.
- Consumo medido: Son los volúmenes de agua contabilizados con ayuda de medidores.
- Consumo no medido: es la resta entre el volumen de inyección autorizado y el consumo autorizado medido, proveniente del consumo de usuarios sin contador.
- Consumo facturado: volumen de agua potable que consume un abonado y que es cobrada, la cual puede ser medida o estimada.

- Consumo no facturado: volumen de agua que es inyectada pero no es cobrada. Esta abarca pérdidas por roturas, conexiones ilegales, errores de medición, morosidad de clientes y agua autorizada a ciertas autoridades y servicios.
- Pérdidas aparentes: también llamadas pérdidas comerciales, son volúmenes de agua que debería facturarse, pero es pérdida debido a tomas no autorizadas, errores de medición o cálculo.
- Consumo no autorizado: consisten en agua desviada por conexiones clandestinas.
- Inexactitudes de medición: errores por el subcontaje y sobrecontaje de caudalímetros averiados, mal calibrados o manipulados por usuarios.
- Errores de manejo de datos: imprecisiones debido al error humano como la toma de datos o en la realización de cálculos.
- Pérdidas en tuberías principales: también llamadas pérdidas reales, son fugas o roturas en las líneas principales del abastecimiento.
- Pérdidas por desbordes de tanques: agua fugada de tanques de almacenamiento de agua debido a fallos o inexistencia de bollas o sensores de nivel máximo.
- Pérdidas en acometidas domiciliarias: son fugas o roturas en las conducciones que conectan las tuberías principales con los caudalímetros de los abonados. Estas se dan especialmente entre las conexiones de las tuberías y los accesorios.

5.2 RECOLECCIÓN Y ESTIMACIÓN DE DATOS

Desafortunadamente el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales no incluye entre sus informes estadísticos el balance hídrico del abastecimiento de la ciudad de Panamá, pero en estos incluyen ciertos datos con los cuales se puede elaborar esta metodología. Entre los datos que dominio público están: la inyección total de la red, el consumo autorizado y facturado, y el consumo autorizado, facturado y no medido.

Algunos valores tuvieron que ser estimados mediante porcentajes proporcionados por el último estudio realizado a través del Programa de Saneamiento de la Bahía de la Ciudad de Panamá, estos datos fueron:

- Pérdidas reales: 62.73% de las pérdidas totales.
- Pérdidas aparentes: 37.27% de las pérdidas totales.
- Consumo no autorizado: 30.32% de las pérdidas totales.
- Inexactitudes de medición: 4.63% de las pérdidas totales.
- Errores de manejo de datos: 2.31% de las pérdidas totales.

A falta de datos los cuales no han sido publicados por las entidades gubernamentales, otros valores fueron aproximados utilizando porcentajes del estudio: Cálculo de porcentaje de pérdidas por fugas en la red de agua potable en Celaya, Gto, ya que esta ciudad tiene un espacio y desarrollo urbanístico parecido al de la ciudad de Panamá. Estos valores fueron:

- Fugas en tuberías principales: 73% de las fugas reales.
- Desborde de tanques: 7.33% de las fugas reales.
- Fugas en conexiones domiciliarias: 19.66% de las fugas reales.

Mientras que otros datos pueden ser estimados fácilmente como:

- Consumo autorizado y no facturado: mediante una proporción simple entre los clientes facturados y su consumo con los clientes morosos.
- Consumo autorizado: sumando el consumo autorizado facturado y no facturado.
- Consumo autorizado, facturado y medido: restando el consumo autorizado y facturado total el consumo no medido.
- Consumo autorizado, no facturado y no medido: restando del consumo autorizado y no medido del consumo autorizado facturado y no medido.
- Consumo autorizado, no facturado y medido: restando del consumo autorizado y no facturado el consumo autorizado, no facturado y no medido.
- Pérdidas totales: restando de la inyección total el consumo autorizado.

5.3. BALANCE HÍDRICO DEL AÑO 2022.

Tabla 11: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 en millones de galones/año.

| | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|
| Inyección total a la red 97,146 | Consumo autorizado 86,002 | Consumo autorizado y facturado 46,616 | Consumo autorizado, facturado y medido 32,468 | Agua con ganancias 46,616 |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 14,148 | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 39,386 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 22,234 | |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 17,152 | |
| | Perdidas 11,144 | Perdidas aparentes 4,153 | Consumo no autorizado 3,379 | |
| | | | Inexactitudes de medición 516 | |
| | | | Errores de manejo de datos 258 | |
| | | Perdidas reales 6,991 | Fugas en tuberías principales 5,104 | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 349 | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 1,374 | |
| | | | Agua sin ganancias 50,530 | |

Tabla 12: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 en millones de m³/año.

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|---|-----------------------------|--|
| Inyección total a la red 364.7 | Consumo autorizado 335.9 | Consumo autorizado y facturado 227.0 | Consumo autorizado, facturado y medido 173.5 | Agua con ganancias 227.0 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 53.5 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 107.0 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 84.3 | Agua sin ganancias 137.7 | |
| | | Consumo autorizado, no facturado y medido 24.7 | | | |
| | Perdidas 28.8 | Perdidas aparentes 10.7 | Consumo no autorizado 8.7 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 1.3 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 0.7 | | |
| | | Perdidas reales 18.0 | Fugas en tuberías principales 13.2 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 1.3 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 3.5 | | |

5.4. BALANCE HÍDRICO DE AÑOS ANTERIORES.

Tabla 13: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2021 en millones de galones/año.

| | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--|---|------------------------------|--|
| Inyección total a la red 96,345 | Consumo autorizado 88,748 | Consumo autorizado y facturado 59,959 | Consumo autorizado, facturado y medido 45 837 | Agua con ganancias 59,959 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 14,121 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 28,788 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 22,264 | Agua sin ganancias 36,386 | |
| | | Consumo autorizado, no facturado y medido 6,524 | | | |
| | Perdidas 7,597 | Perdidas aparentes 2,831 | Consumo no autorizado 2,304 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 352 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 176 | | |
| | | Perdidas reales 4,765 | Fugas en tuberías principales 3,480 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 349 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 937 | | |

Tabla 14: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2021 en millones de m³/año.

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|---|-----------------------------|--|
| Inyección total a la red 364.7 | Consumo autorizado 335.9 | Consumo autorizado y facturado 227.0 | Consumo autorizado, facturado y medido 173.5 | Agua con ganancias 227.0 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 53.46 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 109.0 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 84.3 | Agua sin ganancias 137.7 | |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 24.7 | | |
| | Perdidas 28.8 | Perdidas aparentes 10.7 | Consumo no autorizado 8.7 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 1.3 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 0.7 | | |
| | | Perdidas reales 18.0 | Fugas en tuberías principales 13.2 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 1.3 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 3.5 | | |

Tabla 15: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2020 en millones de galones/año.

| | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|--|
| Inyección total a la red 98,852 | Consumo autorizado 92,099 | Consumo autorizado y facturado 60,320 | Consumo autorizado, facturado y medido 46,163 | Agua con ganancias 60,320 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 14,156 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 31,779 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 24,376 | Agua sin ganancias 38,532 | |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 7,402 | | |
| | Perdidas 6,753 | Perdidas aparentes 2,517 | Consumo no autorizado 2,048 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 312 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 156 | | |
| | | Perdidas reales 4,236 | Fugas en tuberías principales 3,093 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 310 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 833 | | |

Tabla 16: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2020 en millones de m³/año.

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|---|-----------------------------|--|
| Inyección total a la red 374.2 | Consumo autorizado 348.6 | Consumo autorizado y facturado 228.3 | Consumo autorizado, facturado y medido 174.7 | Agua con ganancias 228.3 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 53.6 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 120.3 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 92.3 | Agua sin ganancias 145.9 | |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 28.0 | | |
| | Perdidas 25.6 | Perdidas aparentes 9.5 | Consumo no autorizado 7.7 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 1.2 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 0.6 | | |
| | | Perdidas reales 16.0 | Fugas en tuberías principales 11.7 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 1.2 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 3.1 | | |

Tabla 17: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2019 en millones de galones/año.

| | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|--|
| Inyección total a la red 96,245 | Consumo autorizado 85,950 | Consumo autorizado y facturado 60,603 | Consumo autorizado, facturado y medido 46,470 | Agua con ganancias 60,603 | |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 14,133 | | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 25,347 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 21,510 | Agua sin ganancias 35,643 | |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 3,838 | | |
| | Perdidas 10,295 | Perdidas aparentes 3,837 | Consumo no autorizado 3,121 | | |
| | | | Inexactitudes de medición 477 | | |
| | | | Errores de manejo de datos 238 | | |
| | | Perdidas reales 6,458 | Fugas en tuberías principales 4,715 | | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 473 | | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 1,269 | | |

Tabla 18: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2019 en millones de m³/año.

| | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|---|-----------------------------|
| Inyección total a la red 364.3 | Consumo autorizado 325.4 | Consumo autorizado y facturado 229.4 | Consumo autorizado, facturado y medido 175.9 | Agua con ganancias 229.4 |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 53.5 | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 95.9 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 81.4 | Agua sin ganancias 134.9 |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 14.5 | |
| | Perdidas 39.0 | Perdidas aparentes 14.5 | Consumo no autorizado 11.8 | |
| | | | Inexactitudes de medición 1.8 | |
| | | | Errores de manejo de datos 0.9 | |
| | | Perdidas reales 24.4 | Fugas en tuberías principales 17.8 | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 1.8 | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 4.8 | |

Tabla 19: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2018 en millones de galones/año.

| | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|
| Inyección total a la red 97,918 | Consumo autorizado 85,462 | Consumo autorizado y facturado 60,071 | Consumo autorizado, facturado y medido 45,939 | Agua con ganancias 60,071 |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 14,132 | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 25,391 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 23,714 | Agua sin ganancias 37,847 |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 1,677 | |
| | Perdidas 12,455 | Perdidas aparentes 4,642 | Consumo no autorizado 3,777 | |
| | | | Inexactitudes de medición 576 | |
| | | | Errores de manejo de datos 288 | |
| | | Perdidas reales 7,813 | Fugas en tuberías principales 5,704 | |
| | | | Fugas por desbordes de tanques 572 | |
| | | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 1,535 | |

Tabla 20: Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2018 en millones de m³/año.

| | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|--|-----------------------------|
| Inyección total a la red 370.7 | Consumo autorizado 323.5 | Consumo autorizado y facturado 227.4 | Consumo autorizado, facturado y medido 173.9 | Agua con ganancias 227.4 |
| | | | Consumo autorizado, facturado y no medido 53.5 | |
| | | Consumo autorizado y no facturado 96.1 | Consumo autorizado, no facturado y no medido 89.8 | Agua sin ganancias 143.3 |
| | | | Consumo autorizado, no facturado y medido 6.3 | |
| | Perdidas aparentes 17.6 | Consumo no autorizado 14.3 | | |
| | | Inexactitudes de medición 2.9 | | |
| | | Errores de manejo de datos 1.1 | | |
| | Perdidas reales 29.6 | Fugas en tuberías principales 21.6 | | |
| | | Fugas por desbordes de tanques 2.2 | | |
| | | Fugas en conexiones domiciliarias (antes del caudalímetro) 5.8 | | |

5.5. COMENTARIOS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS BALANCES HÍDRICOS.

Se puede apreciar cómo el valor de la inyección total de la red varía poco a través de los años, con excepciones del año 2018 y 2020 con incrementos del 1.7% y 2.7% respectivamente.

También se ha observado que las pérdidas han tendido a disminuir entre 2018 a 2020 disminuyeron en un 54% y, pero aumento el año siguiente en un 12%.

En el año 2020 fue en el que se generó mayor volumen de agua sin ganancias, pero en los años posteriores disminuyó un 5%. Mientras que el agua con ganancias ha cambiado muy poco, con variaciones de hasta un 1.1%.

5.6. CALIDAD DE DATOS DE LOS BALANCES HÍDRICOS

El balance hídrico del abastecimiento de la ciudad de Panamá se asignó una clasificación de calidad regular (★★). Esto ya que la actualización de datos más recientes fue del año 2022 y únicamente hubo cuatro datos publicados por el abastecimiento, mientras que el reto debió ser calculado, extrapolado o estimado. Aunque los valores proporcionados por el IDAAN y el saneamiento de la bahía pueden tener fiabilidad al ser coherentes y al no variar significativamente entre un año y otro.

6.FUGAS

Las fugas en tuberías y accesorios de sistemas potables son origen importante del derroche del recurso para los abastecimientos, generando una pérdida monetaria millonaria y una afectación ecológica al desperdiciarse tanto el recurso hídrico como la energía necesaria para su potabilización y transporte.

Una de las principales amenazas provocadas por las fugas es la debilitación estructural de los materiales alrededor de la tubería como el acero, el hormigón y la madera; adicionalmente pueden ocasionar corrosión y óxido en materiales metálicos.

También cualquier fuga de agua conlleva el riesgo de que crezca moho, ya que esta se propaga en condiciones de humedad. En el caso de las viviendas, aparte de los daños causados, puede conllevar a comprometer la salud respiratoria de sus habitantes cuando las personas y los animales están expuestos al hongo.

Esta problemática aumenta el peligro de incendio ya en el caso de que la fuga se sitúe junto a componentes eléctricos, generando cortocircuitos y chispas; asimismo puede ocasionar un accidente de electrocución, como el agua es un buen conductor de la electricidad posee la fuerza necesaria para lesionar a una persona.

También existe el riesgo de que el agua le llegue al usuario sucia o con coloración. Ya que, al haber una fuga, el agua se acumula en el suelo y en el caso de un corte de servicio, los sólidos y la suciedad entrarán a la tubería por la fuga; afectando la calidad del agua y exponiendo a los abonados a riesgos de salud por consumir el agua con elementos tóxicos.

También las fugas son causantes del sobre contaje en los contadores ya que la demanda de caudal de esta es tan poca que el contador no es capaz de medirla, por consiguiente, los abonados pagarían por volúmenes que no demandaron.

6.1 CAUSAS DE LAS FUGAS

- **Corrosión:** A través de los años, los sistemas de abastecimiento envejecen por lo que en las tuberías metálicas aparece óxido, y con ello la corrosión y apertura de las tuberías. Se estima que su aparición se da entre 20 a los 70 años de vida de la tubería, pero existen factores del entorno que puedan acelerarla como el pH ácido y el desequilibrio de los minerales en el agua.
- **Errores de diseño:** Los errores en la asignación de diámetros en una red usualmente conllevan a deficiencias leves en el rendimiento hidráulico, pero en casos más críticos puede causar fenómenos de cavitación que provoquen la creación de grietas.
- **Fatiga del material:** es el desgaste producido por cargas cíclicas las cuales el material no puede soportar, provocando grietas que se irán ampliando y posteriormente causarán una rotura. Ante mayor tensión, menos tiempo podrá soportar el material hasta la rotura. Un método para evitar esta problemática es reducir las presiones del flujo al mínimo posible y reducir el esfuerzo a que son sometidas las paredes internas de las tuberías y sus accesorios.

- **Instalación incorrecta:** El montaje de tuberías potables es relativamente más sencillo a comparación de otros sistemas, por lo que se le presta menos atención, de ahí que la mayoría de las fugas sean el resultado de una errónea instalación.
- **Fallas en las juntas:** La zona con mayor vulnerabilidad es las uniones por lo que es común que las primeras fallas de un sistema se encuentren en éstas. Las juntas se separan lentamente con el funcionamiento a presión del sistema al componerse de piezas distintas unidas por un elemento externo.
- **Movimientos subterráneos:** Cuando se da un movimiento significativo en el suelo (como temblores, movimiento de los cimientos de las edificaciones o de trabajos de terracería, crecimiento de árboles e inundaciones) donde se sitúan las tuberías pueden arquearse, torcerse, rajarse o desconectarse, originando las averías.
- **Sobrepresión:** Las tuberías y los accesorios tienen una presión de trabajo máxima, donde al sobrepasarla existe el riesgo de debilitar los componentes del sistema o escenarios extremos generar un desprendimiento abrupto de las tuberías.
- **Intrusión de raíces:** Cuando una planta necesita humedad, esta buscará un suministro de agua por lo que es natural que crezcan en dirección a las tuberías suministro potable, y pueden perjudicar a las tuberías de agua, infiltrándose y creando aperturas.
- **Cambios de temperatura:** En las temporadas de frío y calor extremos, las tuberías de metal se contraen y expanden, reduciendo su durabilidad a la vez que provocando aberturas.
- **Agua dura:** Ciertos minerales (calcio y magnesio) que contiene el agua pueden acumular en el interior de las tuberías y eventualmente causando atascos, fisuras y obstrucciones.
- **Exposición al sol:** las tuberías plásticas se ven afectadas por la exposición a la radiación ultravioleta. Cuando son sometidos a dicha luz durante un tiempo extenso, pueden sufrir daños superficiales, por lo que se recomienda emplear compuestos especiales para este fin o protegerlos con recubrimientos adecuados. La exposición de plásticos a la luz solar hace que las moléculas del material se decoloren y afecte la resistencia a la presión interna del flujo; cuanto más gruesa es la pared de la tubería más imperceptible se vuelve el efecto.

6.2. METODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS

- **Cambio de presión:** Este es uno de los principales y fáciles indicadores de la presencia de fugas, pero también es necesario que se fugue un caudal considerable para que se aprecie una diferencia en la presión del sistema. Cabe resaltar que puede automatizarse su detección por este método al utilizar accesorios de teledetección.
- **Prueba auditiva:** Pueden ser identificadas si se escucha un silbido o un burbujeo proveniente del lugar de la instalación del sistema, esto solo escuchando la parte externa de las tuberías o mediante sensores acústicos los cuales crean sus propias vibraciones sonoras y captan los sonidos de alta frecuencia originados por las grietas. Mientras mayor tamaño tenga la fuga, la frecuencia será más baja.

- Prueba visual: Ciertas fugas son rápidamente identificables por cambios al terreno o la acumulación del líquido en la superficie, pero otras no son descubiertas durante tiempo prolongado, debido a que no se dan alteraciones visibles debido a su profundidad y a percolar en el terreno. Es la prueba más utilizada en el caso de edificaciones por la temprana aparición de goteras y por superficies húmedas.
- Prueba térmica: Utilizando una cámara termográfica, es posible ubicar fugas por la humedad que estas provocan y sin la necesidad de desmontar las infraestructuras alrededor de las tuberías. Su desventaja es que no garantiza la presencia de fugas al identificar un patrón de humedad ya que existen múltiples razones por las cuales se puede observar una diferencia de temperatura además de la humedad.
- El radar de penetración terrestre: Esta es una prueba que evita las excavaciones ya que funciona con una antena que emite ondas electromagnéticas, las cuales detectan materiales y líquidos en el interior del suelo, como tuberías y fugas. Posteriormente las lecturas se usan para crear imágenes del subterráneo que permitan encontrar la localización y la dimensión de las fugas. La limitación de este método es que solo es viable utilizarlo en áreas reducidas.
- Radar de apertura sintética: Es un método que utiliza un sensor ubicado en un satélite o un avión a una altura de 640 km que ubica y estudia la humedad del suelo e incluso el pavimento, su profundidad de medición es de hasta aproximadamente tres metros, pero abarca áreas de dimensiones mayores a ciudades. Este compila una imagen del área y detecta la dispersión de fuentes de agua transmitiendo ondas electromagnéticas a una frecuencia específica.
- LIDAR (Light Detection and Ranging): Localizar problemas como daños estructurales en los sistemas de abastecimiento utilizando un radar de banda L, detecta bajo el suelo el porcentaje de concentración de humedad repitiéndolo periódicamente para observar cambios. Esto lo logra enviando pulsos láser que calculan el tiempo en que la onda es reflejada por objetos. Su desventaja es que es una tecnología compleja requiere de una gran inversión inicial.
- Inspección con cámaras: Este método observa el interior de las tuberías mediante una cámara de vídeo conectada a un computador con cables de fibra óptica para inspeccionar y detectar las averías. También dispone de un transmisor que ofrece la ubicación GPS de la cámara para obtener la localización al observar una fuga.

7. ESTUDIO CON INDICADORES

Un indicador es una herramienta utilizada para estimar y comparar los resultados obtenidos con los resultados proyectados en calidad y cantidad. Usualmente son utilizados para resaltar logros o establecer una meta a la que se quiere llegar.

El desempeño de cualquier institución se puede medir con el uso de indicadores, pero estos deben de ser escogidos con cautela para poder conseguir una percepción general del progreso y evolución de variados aspectos, usualmente estos se concentran en un conjunto de parámetros chicos y manejables, que da una imagen amplia del rendimiento.

Un indicador puede ayudar a representar el funcionamiento de un sistema de abastecimiento a lo largo del tiempo. Al seleccionar correctamente los indicadores puede permitir a los gestores enfocarse en mejorar las áreas de trabajo que lo requieran y tomar mejores decisiones ante las problemáticas.

En el sector de la distribución de agua potable el más reconocido es el sistema de indicadores de desempeño de la International Water Association (IWA), este se ha adaptado para establecer un estándar ya que ofrece indicadores adaptables al abastecimiento (ya sea de propiedad gubernamental o privada), vinculado a sus obligaciones y necesidades. Este sistema desde su creación hasta la actualidad ha sido mencionado y usado en numerosos estudios de evaluación de desempeño.

7.1. DEFINICIÓN DE INDICADORES

7.1.1. Indicadores de porcentaje

Para el estudio se utilizaron indicadores de porcentaje, específicamente los de eficiencia global el cual compara el caudal autorizado con el volumen inyectado, el de eficiencia de red que compara el consumo medido con el volumen inyectado y el de eficiencia media que contrasta el caudal medido con el autorizado. Hay que resaltar que estos indicadores de pérdida representados como porcentajes puede dar una percepción imprecisa sobre el funcionamiento del abastecimiento, ya que distintos abastecimientos se comportaran de forma distinta dependiendo de sus características físicas, como la longitud total de las tuberías principales, la cantidad de acometidas y su longitud. Por lo que estos indicadores en vez de aportar datos, desinforman y confunden; sin embargo, se pueden utilizar estos en un mismo abastecimiento comparando su evolución a través del tiempo (si no sufre de cambios físicos significativos).

7.1.2. Indicadores relativos

Ante la problemática de la falta de confianza en los indicadores de porcentaje, se crearon los indicadores relativos. Entre estos están el índice relativo por acometidas (Op23 del manual de indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua de la IWA), que simboliza el volumen de pérdidas aparentes sumado con las reales por cada acometida conectada. También está el índice por presión y acometidas, el cual se calcula igual que el indicador anterior solo que se divide la presión media a la que trabaja el sistema. Y el índice por longitud (Op24 del manual de indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua de la IWA) el cual es la división del volumen total de pérdidas entre la longitud total de las tuberías que posea

la red. Esto permite a los abastecimientos realizar un seguimiento y cotejo con valores normalizados.

Para evaluar la eficiencia de la operación de un abastecimiento se han creado distintas tablas las cuales categorizan cualitativamente el funcionamiento según el valor del índice relativo (Tabla 21).

Tabla 21: Evaluación según el valor del Índice relativo por longitud de red. (Miguel Eduardo Medina, 2019)

| Índice de Pérdidas (%) | Índice Lineal de Pérdidas | | Evaluación cualitativa | Observación |
|------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|---|
| | m ³ /Km/h | m ³ /Km/d | | |
| < 3 | < 0,06 | < 1,44 | muy pocas | inevitables |
| 3 a 10 | 0,06 a 0,25 | 1,44 a 6,00 | pocas | redes nuevas, muy buen mantenimiento |
| 10 a 15 | 0,25 a 0,40 | 6,00 a 9,60 | medias | se puede alcanzar con medios técnicos adecuados |
| 15 a 30 | 0,40 a 1,00 | 9,60 a 24,00 | elevadas | bajo nivel de mantenimiento |
| 30 a 50 | 1,00 a 2,00 | 24 a 48 | muy elevadas | mantenimiento muy limitado |
| > 50 | > 2.00 | >48 | demasiado altas | inaceptables |

7.1.3. Índice de fuga de infraestructura (ILI)

Pero los resultados aún pueden ser afectados por otros factores como la densidad de acometidas, la presión de trabajo y la localización de los caudalímetros del abonado. Por ello se crearon los índices estructurales como el índice de fuga de infraestructura (ILI), que es la relación entre las pérdidas reales anuales actuales (CARL) y el valor de Pérdidas reales anuales inevitables (UARL). El ILI es un indicador adimensional que resalta la eficiencia de la gestión del agua según la infraestructura del sistema el cual tiene el objetivo de estimación y reducción de fugas. Lo deseable es que el ILI tenga un valor lo menor posible (como mínimo 1.0). Mientras que mayor sea este, el abastecimiento tendrá mayor deficiencia en la distribución del agua potable por las pérdidas reales. El UARL es una estimación de cuáles deberían de ser las pérdidas reales mínimas para un sistema siempre y cuando este opere con las condiciones óptimas posibles, posea un sistema de detección y reparación de fugas. Cabe resaltar que, si bien el UARL es el objetivo, no necesariamente es lo más rentable económicamente para el abastecimiento ya que para lograrlo se requiere una gran cantidad de personal, mano de obra, estudios y materiales; lo que a nivel económico es más rentable tener cierto porcentaje de fugas en el sistema.

Entre los indicadores seleccionados para el estudio del abastecimiento de agua potable de la ciudad de Panamá están el índice porcentual para realizar una comparación año a año con el mismo abastecimiento, los índices relativos para compararlo con otro abastecimiento ya que

estos indicadores suelen ser muy utilizados a nivel mundial y el índice de fugas estructural ya que a pesar de no ser el más utilizado, es el más confiable para realizar una comparación entre distintos abastecimientos; con el fin de mejorar la gestión del recurso de una manera más eficiente.

Tabla 22: Evaluación según el valor del Índice de fugas estructurales. (Miguel Eduardo Medina, 2019).

| CATEGORÍA DE RENDIMIENTO TÉCNICO | | ILI | PÉRDIDAS FÍSICAS (l/conexión/día) CUANDO EL SISTEMA ESTÁ PRESURIZADO, EN PROMEDIO, EN: | | | | |
|----------------------------------|---|--------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | | 10 m | 20 m | 30 m | 40 m | 50 m |
| PAÍSES DESARROLLADOS | A | 1 - 2 | | < 50 | < 75 | < 100 | < 125 |
| | B | 2 - 4 | | 50 - 100 | 75 - 150 | 100 - 200 | 125 - 250 |
| | C | 4 - 8 | | 100 - 200 | 150 - 300 | 200 - 400 | 250 - 500 |
| | D | > 8 | | > 200 | > 300 | > 400 | > 500 |
| PAÍSES EN VÍA DE DESARROLLO | A | 1 - 4 | < 50 | < 100 | < 150 | < 200 | < 250 |
| | B | 4 - 8 | 50 - 100 | 100 - 200 | 150 - 300 | 200 - 400 | 250 - 500 |
| | C | 8 - 16 | 100 - 200 | 200 - 400 | 300 - 600 | 400 - 800 | 500 - 1000 |
| | D | > 16 | > 200 | > 400 | > 600 | > 800 | > 1000 |

7.4. CÁLCULOS DE INDICADORES

7.4.1. Cálculo de indicadores de porcentaje

Para calcular los principales indicadores de porcentaje solo se requieren de tres datos: caudal autorizado, inyectado y medido. Estos datos son los utilizados en el balance hídrico del año 2022.

Primeramente, se calcula el índice de porcentaje de eficiencia global el cual se obtiene dividiendo el caudal autorizado con el inyectado por el abastecimiento:

(Ec. 1)

$$\% \text{ eficiencia global anual} = \frac{Q_{\text{autorizado}} \text{ (Mgal)}}{Q_{\text{inyectado}} \text{ (Mgal)}}$$

$$\% \text{ eficiencia global anual} = \frac{86,002}{97,146} = 88.7\%$$

También se puede obtener el índice de porcentaje de eficiencia de red anual, el cual es el cociente del caudal anual medio con el inyectado por el abastecimiento:

(Ec. 2)

$$\% \text{ eficiencia red anual} = Nn = \frac{Q_{\text{medido}} \text{ (Mgal)}}{Q_{\text{inyectado}} \text{ (Mgal)}}$$

$$Nn = \frac{32,468 + 17,152}{97,146} = 51.1\%$$

Por último, está el índice de porcentaje de eficiencia media anual, el cual se calcula dividiendo el caudal anual medio con el autorizado por el abastecimiento:

(Ec. 3)

$$\% \text{ eficiencia medida anual} = \frac{Q_{\text{medido}} \text{ (Mgal)}}{Q_{\text{autorizado}} \text{ (Mgal)}}$$

$$\% \text{ eficiencia medida anual} = \frac{32,468 + 17,152}{86,002} = 51.5\%$$

7.4.2. Cálculo de indicadores relativos

Para obtener los indicadores relativos, primeramente, se requiere de datos iniciales del abastecimiento, los cuales fueron extraídos del boletín estadístico del año 2022. Estos fueron:

Longitud de tuberías principales = L red = 3,068 km.

#acometidas = 325,847 acometidas

Se categorizan como tuberías principales a aquellas propietarias del abastecimiento. Las acometidas son las tuberías que conectan el sistema potable propio de una propiedad con la red de abastecimiento principal.

El siguiente paso es estimar la longitud de las acometidas, para ello con ayuda del software "Google Earth" fueron medidas las longitudes transversales de las calles en numerosos puntos de la ciudad y se promedió una longitud de 4 metros.

Estimación de longitud por acometida = 4 m

Posteriormente se calcula la longitud total de las acometidas multiplicando la longitud estimada por el número de acometidas.

(Ec. 4)

*Longitud total de acometidas = Longitud por acometida * # de acometidas*

$$\text{Longitud total de acometidas} = 4 \frac{m}{\text{acometida}} * (325,847 \text{ acometidas}) * \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$$

Longitud total de acometidas = 1,303.4 km

Antes se realiza las conversiones necesarias para obtener el resultado en unidades del sistema internacional:

$$Q \text{ perdidas reales} = 6990.76 \frac{\text{(Mgal)}}{\text{año}} * \frac{1,000,000.00}{1 \text{ Millon}} * \frac{3,78541 \text{ lit}}{1 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}}$$

$$Q \text{ perdidas reales} = 7.25 \times 10^7 \frac{\text{lit}}{\text{día}}$$

Con estos datos se puede calcular el indicador relativo por longitud de red, este se obtiene dividiendo el caudal anual perdido con la longitud de la red

(Ec. 5)

$$\text{Indicador relativo por longitud de red} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{L_{\text{red}}}$$

$$\text{Indicador relativo por longitud de red} = \frac{7.25 \times 10^7 \frac{\text{lit}}{\text{día}}}{3068 \text{ km}}$$

$$\text{Indicador relativo por longitud de red} = 23,631 \frac{\text{lit}}{\text{km} * \text{día}}$$

También se puede obtener el indicador relativo por acometidas, este es el cociente del caudal perdido real con el número de acometidas de la ciudad.

(Ec. 6)

$$\text{Indicador relativo por acometida} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{\# \text{ acometidas}}$$

$$\text{Indicador relativo por acometida} = \frac{7.25 \times 10^7 \frac{\text{l}}{\text{día}}}{325,847 \text{ acometidas}} = 222.5 \frac{\text{lit}}{\text{acom. día}}$$

Por último, se puede obtener el indicador relativo por presión y acometidas, el cual se calcula dividiendo el caudal perdido real con la multiplicación de la presión media del sistema y el último de acometidas.

(Ec. 7)

$$\text{Indicador relativo por presión y acometidas} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{\text{Presión media} * \# \text{ acometidas}}$$

$$\text{Indicador relativo por presión y acometidas} = \frac{7.25 \times 10^7 \frac{\text{lit}}{\text{día}}}{35 \text{ mca} * 325,847 \text{ acom}}$$

$$\text{Indicador relativo por presión y acometidas} = 6.35 \frac{\text{lit}}{\text{m. c. a.} * \text{acom} * \text{día}}$$

7.4.3. Cálculo de índice de fugas estructurales

Para calcular el índice de fugas estructurales o por sus siglas en inglés ILI (Infrastructure Leakage Index), se requiere obtener anteriormente el caudal anual de perdidas reales o por sus siglas en inglés CARL (current anual real losses), el cual fue extraído del Boletín estadístico N.36 del IDAAN (2022):

$$CARL = 6990.76 \frac{(\text{Mgal})}{\text{año}} * \frac{1,000,000.00}{1 \text{ Millon}} * \frac{3,78541 \text{ l}}{1 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 7.25 \times 10^7 \frac{\text{lit}}{\text{día}}$$

También se necesita obtener las Pérdidas reales anuales inevitables o por sus siglas en ingles UARL (Unavoidable Annual Real Losses),

Este dato puede ser utilizado para pronosticar los menores volúmenes ideales de fugas de tuberías principales anualmente, esto según la suma de longitud total de tuberías principales, cantidad de acometidas, suma de la longitud total de acometidas y presión media de suministro. Este es una suposición del funcionamiento del sistema, en el caso de que las infraestructuras estén en óptimas condiciones. Cabe resaltar que un abastecimiento no debería establecer como objetivo un UARL de volumen cero, es debido a que lo más probable es que se generen fugas por errores humanos o desgaste de materiales. Además de que es económicamente inviable realizar labores de mantenimiento hasta eliminar por completo las perdidas. Este está expresado por la fórmula:

(Ec. 8)

$$UARL = \text{presión media} (a * Lm + B. nc + C. Lp)$$

Donde sus variables empíricas a, b y c fueron establecidas por Allan Lambert en 1990, mediante pruebas de sensibilidad, estableciendo base coherente pero flexible para calcular el UARL para una amplia gama de sistemas de distribución. Los valores de las variables resultantes fueron:

$$A = 18.0$$

$$C = 25.0$$

$$B = 0.8$$

Y el resto de variables representan:

Lm = Longitud de tuberías principales

Nc = Acometidas

Lp = longitud total de las acometidas

Reemplazando los valores de las variables se obtiene:

$$UARL = \text{presión media} (a * Lm + B. nc + C. Lp)$$

$$UARL = 35 \text{ m.c.a} (18 * 3068 \text{ km} + 0.8 * 325,847 \text{ acom.} + 25 * 1,303.4 \text{ km}) \\ = 12,197,031.0$$

Y por último se calcula el ILI con el cociente del CARL entre el UARL:

(Ec. 9)

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} = \frac{\text{Pérdidas actuales}}{\text{Pérdidas ideales}} \\ ILI = \frac{7.25 \times 10^7}{12,197,031.0} = 5.94$$

7.5. COMENTARIOS DE LOS CÁLCULOS.

7.5.1. Comentarios cálculos de indicadores de porcentaje.

Tabla 23: Resultado de los cálculos de los indicadores de porcentaje.

| Indicadores de porcentaje | Año | | | | |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2022 | 2021 | 2020 | 2019 | 2018 |
| % eficiencia global | 88.53% | 92.11% | 93.17% | 89.30% | 87.28% |
| % eficiencia red | 51.08% | 54.35% | 54.19% | 52.27% | 48.63% |
| % eficiencia medida | 57.70% | 59.00% | 58.16% | 58.53% | 55.72% |

Se puede apreciar en la Tabla 16, como en los tres indicadores de porcentaje mejoraron su eficiencia durante los años 2020 y el 2021, pero en el 2022 estos bajaron levemente.

7.5.1. Comentarios sobre los cálculos de indicadores de relativos

Al comparar el índice relativo por longitud de red obtenido de 23.63 m³/km/día, con la tabla 14, se categorizaría el abastecimiento con muy elevadas pérdidas de agua y que posee un mantenimiento muy limitado.

7.5.2 Comentarios de los cálculos del índice de fugas estructurales (ILI)

Se recopilaron valores de distintos abastecimientos del índice de fugas estructurales para comparar el valor del ILI con el de la ciudad de Panamá.

Tabla 24: Comparación del índice de fugas estructurales entre distintos abastecimientos.

| Abastecimiento | Año | ILI |
|--------------------------------|-----------|-----|
| Ciudad de Panamá | 2022 | 5.9 |
| Small Systems median (Austria) | 2015 | 1 |
| Slalzburg (Austria) | 2020 | 1.1 |
| De Watergroep (Bélgica) | 2015 | 1.3 |
| Dryanovo City (Bulgaria) | 2018 | 5.8 |
| Razgrad Pilots (Bulgaria) | 2015 | 4.1 |
| Pula (Croacia) | 2016 | 2.9 |
| Lemosos (Chipre) | 2015 | 2.5 |
| Odense (Dinamarca) | 2021 | 0.7 |
| Anjglian Water (Inglaterra) | 2015 | 1.5 |
| Bordeaux (Francia) | 2015 | 2.5 |
| Múnich (Alemania) | 2022 | 2.6 |
| Reggio Emilia (Italia) | 2020 | 2.5 |
| Malta WSC (Malta) | 2015 | 2.1 |
| Scottish Water (Escocia) | 2019 | 4 |
| ILT (Países Bajos) | 2015 | 0.6 |
| Gales (Inglaterra) | 2011/2012 | 1.7 |
| Georgia (USA) | 2011 | 1.8 |
| Toronto (Canadá) | 2003/2014 | 2.7 |
| Zagreb (Croacia) | 2005/14 | 4.5 |

Como se puede observar el valor del ILI de la ciudad de Panamá tiende a ser mayor al resto de abastecimientos, lo que puede significar que sea necesario implementar medidas para la reducción de pérdidas de agua para mejorar los aspectos ecológicos y económicos.

7.6. CALIDAD DE DATOS DE LOS INDICADORES

Los datos requeridos para cálculos de los índices de porcentaje se asignó una clasificación de calidad alta (★★★), debido a que la totalidad de los valores necesitados fueron publicados por el abastecimiento, además de que se encuentran actualizados a la fecha, también los resultados son correspondientes a los boletines estadísticos publicados por el abastecimiento. Los datos requeridos para cálculos del índice de porcentajes se asignó una clasificación de calidad regular (★★), como algunos fueron promediados, estimados e interpolados. Pero he de resaltar que estos se encuentran actualizados a la fecha y los resultados están dentro de un rango coherente. Los datos requeridos para cálculos del índice de fugas estructurales (ILI) se asignó una clasificación de calidad regular (★★), esto debido a que utiliza ecuaciones con valores empíricos asignados por autores, además de variables promediadas y aproximadas.

8. OPTIMIZACIÓN

Ya sea por motivaciones económicas o ambientales, los abastecimientos de suministro de agua deben tener el objetivo de aumentar la rentabilidad y fiabilidad de los sistemas de distribución de agua. Existe una gran inversión de energía eléctrica de un sistema potable, esta dependerá de las tecnológicas aplicadas, la eficiencia de las bombas, los métodos de tratamiento, pérdidas por fricción y accesorios de las tuberías. La optimización del sistema lo realizan los abastecimientos implementando diferentes métodos para reducir las fugas en las redes, aunque esto depende directamente de la situación económica de este. Se pueden destacar los dos métodos principales: la política pasiva y la activa.

La metodología pasiva consiste en ahorrar costos operativos al no poseer un equipo de detección de fugas y solucionar solo las fallas que hayan sido notificadas; lo que provoca que se tenga un sistema con mayores volúmenes de agua fugados y numerosas interrupciones del suministro. Comúnmente es aplicada en lugares donde la extracción y potabilización del agua tiene un coste menor a del control de fugas, sin embargo, en el aspecto medioambiental es la peor elección debido a la pérdida del recurso y la energía empleada en la movilización y purificación. Otro factor a considerar es la velocidad de actuación, donde a mayor tiempo de atención de las problemáticas del sistema mayores serán las pérdidas monetarias; por lo que es importante que el abastecimiento tenga preparados planes de acción para solucionar la incidencia con rapidez.

La política activa se enfoca en realizar inspecciones habituales al sistema con el fin de detectar, prevenir y solucionar las fallas por fugas. Esta metodología también se puede lograr fácilmente con una monitorización constante (sobre todo en las horas nocturnas cuando hay poca demanda) de los caudales entregados y comparándolos con los inyectados según el sector, pudiendo localizar con mayor rapidez las deficiencias. El uso de una política activa de como resultado una reducción significativa de los caudales fugados. Este enfoque incluye la sustitución de tuberías que hayan sobrepasado su tiempo de vida, ya sea porque estén corroídas, presenten grietas o rupturas, por lo que al año se deben renovar considerables kilómetros de tuberías potables. La gran desventaja de la política activa es la inversión económica que se debe realizar, donde muchos abastecimientos no se lo pueden permitir ya que la facturación no cubre los gastos necesarios para aplicarlo.

8.1. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

Estas operaciones se pueden dividir en dos tipos, el primero es el control pasivo el cual se enfoca en realizar trabajos correctivos al sistema en el caso de identificar fisuras o roturas. A pesar de ser el método que permite mayores cantidades de volúmenes fugados, puede ser viable a los abastecimientos que poseen menos de 15% de pérdidas reales.

El segundo tipo de operación es la política activa la cual se basa en disminuir los tiempos de detección y reparación de fugas mediante inspecciones periódicas a los componentes del sistema de abastecimiento; con el objetivo de realizar una mayor inversión en la localización de problemáticas para reducir las pérdidas económicas por las pérdidas del agua potabilizada. La inspección del sistema también se puede lograr con dispositivos de tele medida (data loggers, totalizadores electrónicos, emisores de pulsos, medidores de caudal y presión).

8.1.1. Reemplazo de la tubería

Para las tuberías plásticas la forma correcta de realizarlas es primeramente cerrar el paso del agua, después se corta la tubería 2 a 3 centímetros del área afectada usando una tijera especializada para cortar tuberías plásticas. Una vez salga en exceso de agua de debe secar la tubería para aplicar un imprimador al interior de los accesorios de unión y al exterior del tubo original. Posteriormente se aplica cemento solvente en la exterior tubería y en el interior del accesorio de unión, se insertan con un movimiento giratorio y se sostiene fijamente durante 10 segundos para un acoplamiento más seguro.

En el caso de tuberías de polipropileno se utiliza un calentador el cual crea una fusión al calentar las dos superficies con una temperatura determinada, a la vez que se le aplica fuerza presionando la unión, lo que provoca mezcla y por tanto fusión.

En el caso de tuberías metálicas chicas igualmente se corta la alimentación de agua para cortar la tubería con una sierra para cortar metales, para desacoplar la tubería desenroscándola por los dos extremos. Antes de instalar la nueva tubería se debe envolver las roscas con cinta de teflón para roscas de tuberías o aplicar un compuesto para juntas de tuberías. Posteriormente se aprieta la unión utilizando dos llaves inglesas.

En el caso de reemplazo de tuberías de hierro fundido, es más recomendable cambiarlas por otros materiales debido a que estas sufren de corrosión después de un tiempo aproximado de 40 años, el proceso para sustituirlo empieza cortando la sección de la fuga con sierra para metales con punta de adiamantada. En el caso de reemplazarla con otra tubería de hierro fundido se coloca la nueva tubería en la ubicación de la anterior y se utiliza pegamento o bridas (dependiendo del diámetro de la tubería) a los extremos para unirla al sistema. Si se reemplaza con una tubería plástica, se realiza el mismo corte solo contemplando que se utilizara un adaptador para conectar tuberías de plástico con tuberías de hierro fundido, estos usualmente funcionan mediante la unión de dos roscas o con bridas.

En el caso de tuberías metálicas de gran tamaño, estas poseen bridas las cuales se unen con tornillos, por lo que simplemente se debe desacoplar la tubería con el daño y atornillar la tubería nueva.

8.1.2. Reparación

En el caso de las tuberías plásticas existen distintas alternativas como utilizar cinta de resina de fibra de vidrio. Esta se debe utilizar para reparaciones temporales destinadas a frenar las fugas pequeñas con resina activada por agua. También se puede utilizar cinta de silicona, para pequeñas grietas, mediante un caucho que se envuelve alrededor de la incidencia. Igualmente se pueden usar abrazaderas de manguera para una solución temporal, estas mediante presión sellan las fugas, aunque previamente se debe colocar una goma en el área perjudicada, para luego fijar las abrazaderas. En el caso de grietas de tamaño medio se puede utilizar masilla epoxi, esta crea una superficie en el espacio faltante, esta seca en minutos por lo que el sistema puede volver a estar en funcionamiento rápidamente. Según el caso, se puede utilizar cinta para tuberías rotas como una reparación casi permanente, es una cinta de silicona que sella las tuberías aplicando sello hermético a presión. Para tuberías de grandes diámetros se utilizan abrazaderas ajustadas por presión con pernos y tuercas o electro soldables la cual para ajustarse

requiere una máquina de soldadura por electro fusión. En el caso de grietas de mayor tamaño será necesaria una sustitución de la tubería

Para las tuberías metálicas se puede reparar pequeñas fugas temporalmente utilizando un sellador o masilla epoxi para reparar temporalmente la tubería. Otra solución temporal es usar una envoltura de fibra de vidrio de uretano curado por humedad, asegurándola con una barra de epoxi, esta permite su instalación sobre tuberías con fugas activas y tiene una instalación sencilla y rápida. Las grietas de tamaño medio pueden ser reparadas temporalmente con un parche de neopreno junto con abrazaderas de manguera para asegurarlo. También son utilizados manguitos de acero inoxidable flexibles, los cuales utilizan unas abrazaderas con tuercas y tornillos para su ajuste. Para ciertas tuberías de metal como el hierro fundido se repararán soldando piezas de fundición en el área de la fisura o ruptura, aunque se describe como un proceso conflictivo ya que se requiere de temperaturas muy altas (787 °C) para lograr moldear el material.

8.1.3. Revestimiento con tubería continua.

Esta alternativa consiste en recubrir la tubería averiada insertando un tubo flexible con una capa de resina epoxi termo curable para posteriormente ajustarlo con presión o calor y esperar a que la resina se endurezca. Cabe resaltar que al insertar una tubería dentro de otra se reducirá el diámetro con el que originalmente se planteó la instalación. La gran ventaja de esta metodología es que no es necesario realizar excavaciones para realizarla.

Es imprescindible prevenir daños por bien público, prever qué podría conllevar de no reparar adecuadamente una tubería defectuosa adecuadamente. La planificación y la implementación de medidas correctivas evitarán fugas y averías.

8.1.4. Mantenimiento

El mantenimiento de los sistemas de abastecimiento se puede realizar abarcando los distintos componentes de éste. Una buena práctica es el vaciado y la limpieza de los tanques de almacenamiento, ya que a pesar de que estos contengan agua potable, está en el recorrido de las líneas pueden arrastrar solidos que erosionan las paredes internas de las tuberías y accesorios, los cuales ingresan desde las grietas o al realizar los trabajos de nuevas conexiones.

Se debe tomar en cuenta el mantenimiento de las bomba: lubricando sus partes móviles, limpiando periódicamente los filtros de admisión, detectando problemas de sobrecalentamiento o cavitación, reemplazando piezas deterioradas como impulsores, sellos, cojinetes, mangueras, válvulas, acoplamiento del motor, asegurando que los componentes eléctricos estén aislados y rectificando que los fusibles operen en condiciones óptimas.

En el caso de las tuberías deben ser limpiadas y pulidas para evitar la acumulación de residuos, evitando la formación de óxido y corrosión. La limpieza se realizará dependiendo del tipo de material, utilizando productos y herramientas que no sean agresivos ni deterioren la tubería. Una técnica comúnmente aplicada es la limpieza con equipos presurizados de impulsión de agua, que logran remover la suciedad.

Los abastecimientos deben implementar un programa de mantenimiento de válvulas donde la frecuencia dependerá del tamaño y el caudal de agua que fluye a través de la válvula. Es necesario girarlas de su posición habitual periódicamente para liberar las impurezas de la

compuerta; de lo contrario se puede formar depósitos de sólidos en las partes móviles de la válvula y resultara difícil o imposible utilizar la válvula manualmente.

El mantenimiento de los contadores mecánicos consiste en la limpieza de sus filtros. El tiempo de limpieza dependerá de la calidad de agua potable de la zona, pero el tiempo promedio recomendado es de 3 años. Los contadores no mecánicos requieren de otras operaciones especializadas para asegurar su buen funcionamiento.

8.2. CÁLCULOS DE LA OPTIMIZACIÓN

Para el manejo económico del sistema potable se requiere datos del mismo y con ellos establecer un control activo de frecuencia de inspecciones y reparación de fugas. El objetivo es lograr la situación óptima donde los costes de inspecciones, mantenimiento y reparación sean igualados al capital perdido por fugas.

Primeramente, se necesita el dato del caudal y el volumen de perdidas anual (extraído del balance hídrico del 2022):

$$Q_{\text{perdidas reales}} = 5,104.0 \frac{(Mgal)}{\text{año}} * \frac{1,000,000.00}{1 \text{ Millon}} * \frac{3.78541 \text{ lit}}{1 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}}$$

$$Q_{\text{perdidas reales}} = 52.933 \times 10^6 \frac{\text{lit}}{\text{día}}$$

$$Q_{\text{perdida real}} = 52.933 \times 10^6 \frac{\text{lit}}{\text{día}} = \left(52.933 \times 10^6 \frac{\text{lit}}{\text{día}} \right) * \left(\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right) = 19.32 \times 10^9 \frac{\text{lit}}{\text{año}}$$

Posteriormente se necesita el coste por volumen del agua potabilizada, este dato fue extraído partiendo del promedio de consumo de un habitante en la ciudad de Panamá consume 507 litros al día. Además, se estimó cada abonado está conformado por cuatro habitantes.

Caudal promedio consumido por abonado al día (Q abo):

$$Q_{\text{abo}} = 507 \frac{\text{lit}}{\text{personas} * \text{día}} * \frac{4 \text{ Habitantes}}{1 \text{ Abonado}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.7854 \text{ lit}} * \frac{30 \text{ día}}{1 \text{ mes}} = 16,072.3 \frac{\text{gal}}{\text{mes}}$$

Al observar la tabla 1 que muestra las tarifas servicio de agua potable por bloque de consumo, este consumo promedio corresponde al bloque entre 16 a 20 Miles de galones al mes, en el cual la tarifa es de 1.51\$/Mil galones/mes.

Tarifa de consumo por abonado (C_{H_2O} al abonado):

$$C_{H_2O} \text{ al abonado} = \frac{1.51\$}{1000 \text{ gal}} * \frac{264.172 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lit}} = 0.4 \times 10^{-3} \frac{\$}{\text{lit}}$$

Pero este no es el costo de producción del agua, en el boletín estadístico del 2022 del IDAAN, muestra que el abastecimiento tiene una rentabilidad económica del -8.3%. Por lo que este porcentaje se utilizará como un coeficiente de mayoración para estimar el costo del agua para el abastecimiento:

(Ec.10)

$$C_{H_2O} \text{ mayorado} = C_{H_2O} * (1 + (-1 * \text{Rentabilidad económica del abastecimiento}))$$

$$C_{H_2O} \text{ mayorado} = 0.4 \frac{\$}{\text{m}^3} * (1 + (-1 * -0.83))$$

$$C_{H_2O} \text{ mayorado} = 0.43 \frac{\$}{\text{m}^3} = 0.43 \times 10^{-3} \frac{\$}{\text{lit}}$$

(Ec.11)

$$\text{Coste anual del agua perdida} = V * CW$$

$$\text{Coste anual del agua} = (19.32 \times 10^9 \text{ lit}) * \left(0.43 \times 10^{-3} \frac{\$}{\text{lit}}\right)$$

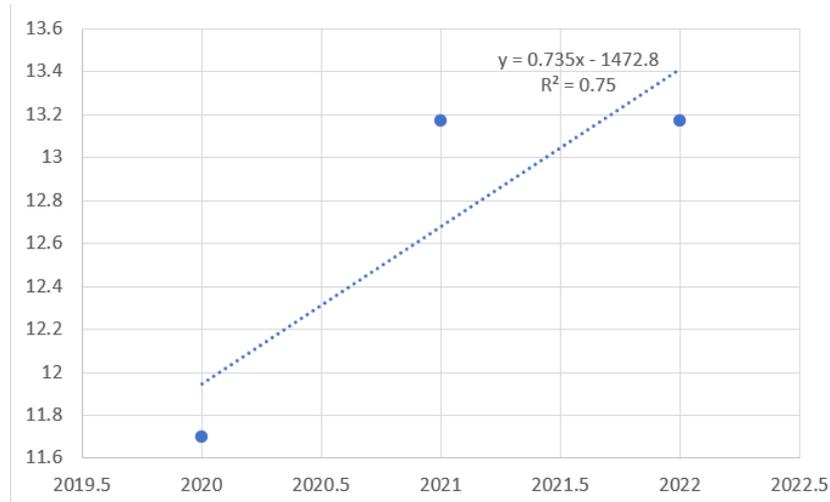
$$\text{Coste anual del agua fugada} = 8,307,600 \$$$

Después se calcula índice de aumento de fugas o también llamado Natural Rate Rise of Leakage (NRRL), el cual en la práctica de una política pasiva es el valor medio en que acrecientan los caudales de fuga no comunicados. En este trabajo este valor se va a aproximar dividiendo el caudal diario de pérdidas reales entre el tiempo de estudio de la realización de las inspecciones. El método se basa en gráficos donde se plasman los datos de caudales de fugas con el tiempo transcurrido en años y obtener la pendiente de este. Cabe resaltar que este es una aproximación para determinar el NRRL, ya que se requiere de los datos diarios de caudal de fugas para obtener un valor preciso, pero lamentablemente el abastecimiento solo publica datos anuales. Estos fueron extraídos de los balances hídricos realizados de los años 2020, 2021 y 2022. Posteriormente se obtiene la pendiente de los puntos.

Tabla 25: Datos de volumen de agua fugada en tuberías principales del abastecimiento (en millones de m3).

| Año | Caudal |
|------|--------|
| 2020 | 11.7 |
| 2021 | 13.17 |
| 2022 | 13.17 |

Gráfico 5: Evolución anual del volumen de agua fugada en tuberías principales del abastecimiento.



Pendiente de los puntos = 0.735

$$NRRL = 0.735 \frac{Mm^3}{Año * Año}$$

$$NRRL = 0.735 \frac{Mm^3}{Año * Año} * \frac{1,000,000 m^3}{1Mm^3} = 735,000 \frac{m^3}{Año * Año}$$

$$NRRL = 735,000 \frac{m^3}{Año * Año} * \frac{1año}{365 días} * \frac{1año}{365 días} = 5.52 \frac{m^3}{día * día}$$

$$NRRL = 5.52 \frac{m^3}{día * día} * \frac{1000 lit}{1m^3} = 5517.0 \frac{lit}{día * día}$$

Con estos datos obtenidos se puede calcular el periodo óptimo entre inspecciones o en inglés Optimal inspections period (OIP) con la siguiente fórmula:

(Ec.12)

$$OIP = \sqrt{\frac{CI}{CW * NRRL * 0.5}}$$

Donde:

$$CI = \text{Costes de inspección anual} = \text{Coste anual del agua fugada}$$

El coste de inspección anual fue extraído del boletín estadístico del IDAAN del 2022.

$$OIP = \sqrt{\frac{8,307,600 \$}{0.4 \times 10^{-3} \frac{\$}{lit} * 1.99 \times 10^5 \frac{lit}{día * día} * 0.5}} = 456 \text{ días}$$

Una vez determinado los días entre inspecciones, se calcula el porcentaje de red a inspeccionar al año (%RI):

(Ec.13)

$$\%RI = \frac{T}{OIP} * 100 = \frac{365 \text{ días}}{456 \text{ días}} * 100 = 80.04 \%$$

También se puede establecer el coste anual de inspecciones o annual cost inspection (ACI), multiplicando el porcentaje de red inspeccionada con el coste de inspección anual, obtenido del boletín estadístico del IDAAN del 2022:

(Ec.14)

$$ACI = \%RI * CI$$

Donde:

$$C_{inspección\ anual} = \text{Costo de inspección anual}$$

$$ACI = \frac{80.04 \%}{100} * 8,307,600 \frac{\$}{año}$$

$$ACI = 6,649,403 \frac{\$}{año}$$

Por último, se calcula la longitud de red objetivo a inspeccionar al año, multiplicando el porcentaje de red a inspeccionar con la longitud total de la red:

(Ec.15)

$$L_{insp} = \%Ri * L_{red}$$

$$L_{insp} = \frac{80.04 \%}{100} * 5472 \text{ km}$$

$$L_{insp} = 4,379.8 \text{ km}$$

8.3. CALIDAD DE DATOS DE CALCULOS DE OPTIMIZACIÓN

Los datos requeridos para cálculos de los índices de porcentaje se asignó una clasificación de calidad regular (★★), la gran mayoría de que estos fueron publicados por el abastecimiento y se encuentran actualizados, pero otros tuvieron que ser asignados con valores estimados y obtenidos con métodos aproximativos como el del NRRL.

9. CONTADORES

Los contadores de agua son herramientas de medición que permiten conocer el volumen de un fluido a través de tubería.

Es importante el control de la medición del volumen de líquidos para diversas aplicaciones industriales y comerciales. El sector petrolero y de producción de gas natural los utiliza para medir el volumen de combustible que es transportado o procesado. En la agricultura estos medidores son importantes para asegurar el uso racionado del agua y mejorar la distribución de los recursos hídricos, ya que estos sectores utilizan significativos volúmenes tanto para riego, como la eliminación de residuos. Los sectores de sistemas sanitarios los utilizan para medir los volúmenes de aguas residuales para detectar y evitar obstrucciones en las redes por causas como el crecimiento poblacional, el incremento de uso del agua y las precipitaciones intensas. También son utilizados en la elaboración de productos farmacéuticos por la necesidad de certificar una mezcla correcta de los componentes utilizados.

Para los abastecimientos de agua potable los contadores les permiten mejorar la eficiencia al medir la cantidad adecuada de agua que se suministra a cada sector para asegurar un suministro ininterrumpido y también se requieren para permitir la rentabilidad del sistema.

9.1. PERDIDAS DE AGUA POR CONTADORES

9.1.1. Errores de medición

Los contadores de agua operan, proveen datos y envejecen de maneras diferentes dependiendo de los mecanismos o sensores de su interior, pero todos poseen un porcentaje de error o incertidumbre en la medición ($\%_{error\ cont}$), que es la discrepancia entre el volumen proporcionado por el contador y el realmente suministrado. Este porcentaje puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

(Ec.16)

$$\%_{error\ cont} = \frac{V_{med}}{V_{sum}}$$

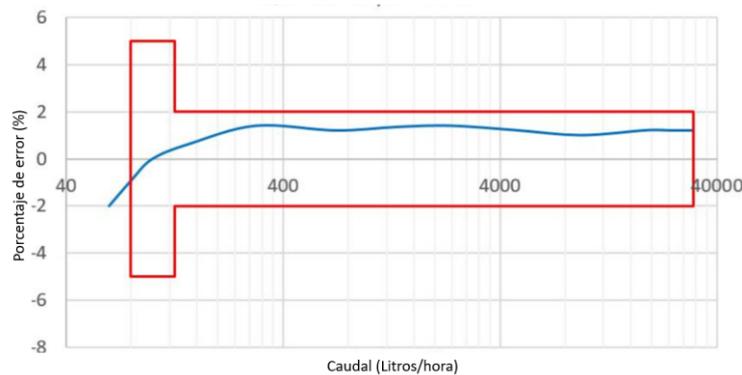
Donde:

V med = Volumen medido

V sum = Volumen suministrado

Al obtener el porcentaje de error en distintos caudales de trabajo, se obtiene la curva de error del contador. Por lo que es necesario que los fabricantes realicen su calibración con pruebas a diferentes consumos con alteraciones dinámicos de la carga, para recrear escenarios reales. Cabe resaltar que tiene un costo elevado realizar estas pruebas, por ello muchos fabricantes no adjuntan en la ficha técnica del medidor la curva de error o la estima erróneamente.

Gráfico 6: Ejemplo de la curva de error de un contador de agua. (Contador chorro único, AQUILA V5, DIHEL Metering)



Este tipo de gráficos son acertados al inicio de la operación del contador, pero su precisión se verá afectada debido al desgaste por su uso.

9.1.2. Manipulaciones a los contadores

En la ciudad de Panamá los contadores de agua se encuentran ubicados en las aceras por normativa con la función de permitir su lectura, pero esto trae como desventaja de que son accesibles para el usuario. La manipulación de contadores de agua involucra vandalizar o dificultar el buen funcionamiento las unidades de medición con el objetivo de reducir los costes a pagar por el servicio. Las alteraciones a contadores de agua son un delito grave y un gran problema para los abastecimientos, ya que los contadores son la herramienta fundamental para lograr ganancias y mantener el servicio.

Entre las prácticas de alteraciones ilegales que realizan los usuarios están:

- Utilizar imanes en contadores de disco magnéticos para que su mecanismo interno se desacople y deje de medir los volúmenes entrantes.
- Extracción del totalizador del cuerpo.
- Realizar perforaciones al contador.
- Desinstalación temporal del medidor o su totalizador.
- Someter el medidor a altas temperaturas para deformar sus partes plásticas.
- Insertar objetos dentro de los contadores mecánicos para que las piezas mecánicas no funcionen correctamente.
- Inclinar el contador.
- Reajustar el tornillo de regulación de los contadores de chorro para que estos registren menos volumen de agua del real entrante.
- Romper las pantallas que proporciona la información del volumen registrado.

- Extraer la batería con la que funcionan los contadores ultrasónicos y electromagnéticos.

El Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) sanciona este delito desde los 300 a los 500 dólares.

Existen métodos para impedir las manipulaciones a los contadores, entre ellos están:

- Aplicar sanciones por la realización de estas prácticas.
- Realizar inspecciones en el caso de consumos anómalos.
- Colocar sellos con los cuales se identifique fácilmente si han sido removidos.
- Adquirir contadores de agua que por su construcción dificulte su manipulación.
- Implementar sistemas de telemedida para una mayor facilidad de inspección del sistema.
- Utilizar espuma expansiva alrededor del medidor, la espuma crea formas las cuales resultan difíciles de recrear en el caso que sea removida.
- En el caso de los contadores de tracción magnética, estos deben disponer de indicadores de magnetismo el cual muestre si un imán fue acercado al medidor. O también contar con protecciones magnéticas.

9.2. TIPOS DE CONTADORES

- Contadores volumétricos: Estos utilizan un pistón giratorio en su interior, este se desplaza de forma circular por la fuerza que ejerce el líquido al atravesar la cámara, en cada giro se vacía y se llena del líquido. Cada ciclo de rotación equivale a un volumen de líquido, generalmente el pistón flotante no tiene contacto con la cámara interior. Estos contadores necesitan de un filtro de malla para prevenir la intrusión de partículas sólidas a su interior. Usualmente son fabricados en latón, plásticos o bronce. Los beneficios de utilizarlos son su exactitud de medición a caudales bajos, pero tienen en contra no soportar presiones elevadas y el desgaste de sus piezas por su uso.
- Contadores Woltmann: Este mide la velocidad del líquido mediante una turbina acoplada a un rotor con palas helicoidales sujetas a un eje central, por su diseño interno permite reducir las pérdidas por fricción con las hélices, se transmite este movimiento al totalizador, mediante un conjunto de engranajes y ensambles magnéticos. Sus ventajas son sus bajas pérdidas de carga, resistencia a altas presiones, exactitud de medición, cobertura de un rango de medición amplio y su capacidad de trabajar a presiones elevadas; pero sus desventajas son en desgaste de la hélice, son más voluminosos y solo puede operar en un solo sentido del flujo.
- Contador de chorro único: Es un medidor que cuenta con una sola cámara y una turbina acoplada en posición radial que gira en función de la velocidad del flujo. Se registra el caudal en el contador gracias al movimiento mecánico cuando gira la turbina de su interior, el cual es simple a comparación de otros. Usualmente su carcasa es fabricada con bronce o plástico, pero los engranajes y piezas de su interior son de termoplásticos o metales apruebas de la corrosión; también existen modelos que utilizan una tracción magnética con un par de imanes, en vez de usar engranajes. Sus bondades son que su precio de mercado es asequible, posee fiabilidad en la medición a caudales elevados y

facilita el paso de sólidos contenidos el flujo ya que las vías de entrada y salida del líquido se localiza en el mismo eje horizontal, pero estos contadores suelen tener más problemas de envejecimiento por el desgaste de sus piezas.

- Contador de chorro múltiple: Utiliza una cámara de distribución que consta de múltiples vías de tránsito del flujo para crear múltiples chorros que impactan con una turbina donde la velocidad de giro de esta se utiliza para determinar el volumen del líquido. Dichos medidores requieren de filtro interno que evite obstrucciones por la acumulación de sólidos. Estos contadores son los más costosos y ocupan mayor espacio a comparación de los de chorro único, pero ofrecen mayor vida útil, poseen mejor fiabilidad de medición ya que la carga a través del impulsor se distribuye uniformemente y es más económico que los contadores no mecánicos.
- Contador electromagnético: Este posee dos sondas ubicadas de manera opuestas (una situada arriba y otras aguas abajo), estas se comunican por ondas ultrasónicas y determinan la velocidad media del flujo según los dos tiempos de desplazamiento (de ida y regreso) de las ondas. Este genera un campo electromagnético cuando se aplica una corriente a bobinas de alambre que pueden estar ubicadas en el interior o el exterior del medidor. El líquido que fluye en su interior opera como conductor que conduce un voltaje que es el que determina la velocidad del flujo. Posteriormente procesa los datos de la velocidad y con la sección transversal conocida, se calcula el volumen que fluye. Como motivos a favor de su uso son que no poseen partes móviles que puedan desgastarse por su uso o generar obstrucciones, no producen pérdidas menores de presión y son sensibles a demandas bajas; por el contrario, tienen en contra tener un precio de compra mayor y requieren de una sustitución de la batería al esta agotarse.
- Contador ultrasónico: Determina la velocidad del líquido utilizando dos transductores que transmiten ondas sonoras midiendo del tiempo del recorrido de la señal emitida, detectada y reflejada. Es necesario utilizar el dato de velocidad para calcular el volumen. Su gran ventaja es que no posee piezas mecánicas que se desgasten, detecta con buena precisión los caudales bajos, tienen capacidades de telemedida por lo que pueden enviar información del volumen a un centro de mando y brindan beneficios económicos a largo plazos por su gran precisión; pero sus desventajas es su significativo elevado coste a comparación a otros contadores del mercado, instalación más compleja y que su funcionamiento este sujeto a la duración de su batería, aunque tienen un bajo consumo energético, por lo que operan durante varios años antes de que sea necesario un reemplazo.

9.3. MANTENIMIENTO DE CONTADORES

Los caudalímetros de chorro y volumétricos no requiere intervención ni servicio ya que el manipularlos internamente podría conllevar a mediciones erróneas, solo se debe asegurar de mantener limpio sus filtros, que las bridas o accesorios de unión estén correctamente fijados y se deben proteger de goteos y sustancias corrosivas. En el caso de los contadores electromagnéticos para comprobar su correcto funcionamiento se mide la resistencia entre los electrodos, después separar el enlace del sensor con el convertidor, para establecer si el rango de medición está dentro de lo especificado por el fabricante. El mantenimiento de los caudalímetros ultrasónicos consiste en utilizar una sonda que limpia generando ondas sonoras

a unas frecuencias en el interior del contador que permitan crear pequeñas burbujas de agua que cavitan, la implosión de estas lava las áreas por un efecto de vacío hacia la superficie permitiendo la limpieza de partículas acumuladas y residuos. Numerosos estudios y fabricantes recomiendan reemplazar los contadores mecánicos cada 10 años y los que no tengan piezas mecánicas cada 15 años.

9.4. CONTADORES UTILIZADOS EN PANAMÁ

Se puede saber con certeza cuales son los contadores más utilizados por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) ya que, al ser una institución gubernamental estos publican las compras de los insumos necesarios para instalaciones y reparaciones. A continuación, se realizó un listado con los contadores más destacables adquiridos por el abastecimiento:

Figura 21: Medidor volumétrico de agua dn15 usflow de de 1/2". (Panamá Compra, 2022).



Figura 22: MT-KD Medidor de Chorro Múltiple de 1/2". (Panamá Compra, 2022).



Figura 23: Medidor de chorro único de transmisión magnética. Atlantis ½". (Panamá Compra, 2022).



Figura 24: Medidor ultrasonico 4" Traxco. (Panamá Compra, 2022).



Figura 25: Medidor Electromagnético Mca.Arkon 4", Rime MAGB1-100. (Panamá Compra, 2022).



Se observa que el abastecimiento utiliza diversos tipos de contadores, su ubicación depende del tipo de consumos y la cantidad de caudal que fluirá por ellos.

9.5. CONTADORES RECOMENDADOS EN PANAMÁ SEGÚN EL SECTOR

El Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) no especifica en qué sector ni en qué lugar se instalan los contadores comprados. Pero se puede intuir su uso dependiendo del tipo de contador:

- **Residencial:** El contador recomendado para estos sería el de chorro único, ya que este reducirá la inversión inicial por su bajo coste y tiempo de vida aceptable. Además de los contadores volumétricos los cuales también son económicos y son sensibles a caudales bajos. El precio de estos dos es acorde a la facturación residencial.
- **Comercial:** El contador recomendado es el de chorro múltiple porque son convenientes para usuarios con un gran consumo como estos tienen una vida mayor a los de chorro único. También este sector tiene demandas muy inconstantes, por lo que estos medidores son adecuados por ser poco sensibles a la variación del perfil de velocidades de entrada.
- **Gubernamental:** El contador adecuado es el electromagnético, este tiene gran sensibilidad a caudales bajos, lo cual es indicado en las horas de poco consumo. Este sector puede tener un gran consumo con el llenado de camiones de bomberos, por los camiones de limpieza de calles o usos recreativos; por lo que este medidor es adecuado por permitir medir grandes caudales.
- **Industrial:** Los contadores adecuados son los ultrasónicos ya que resisten presiones de trabajo elevadas y poseen tiempos de vida mayor a los móviles al no disponer de piezas móviles. Otra opción son los Woltmann ya que poseen mediciones muy fiables a comparación del resto de contadores al medir un amplio rango de caudales y también soportan grandes cargas.

9.6. CALCULOS DE LA GESTIÓN DE CONTADORES EN PANAMÁ

9.6.1. Tiempo de reemplazo de contadores

Las normas panameñas solo hacen mención de que los contadores a utilizar deben tener un tiempo de vida mínimo de 2 años después de su puesta en marcha. Mientras que las normas valencianas establecen que estos poseen un tiempo de vida máximo de 15 años. Pero numerosos estudios sustentan que los contadores domésticos deben de ser reemplazados cada 10 años y los que no son de uso doméstico cada 15 años. Ya que los contadores domésticos usualmente utilizan piezas móviles que suelen tener problemas con el movimiento interno de sus piezas. Mientras que los no domésticos pueden utilizar piezas mecánicas, pero son más robustas y duraderos, además que también se encuentran los contadores no mecánicos como los ultrasónicos o electromagnéticos que pueden tener tiempos de vida mucho mayores.

Mediante cálculos se puede determinar la tasa de sustitución anual de los contadores, la tasa de actualización nominal de los contadores varía según el gestor ya que fija la rentabilidad deseada a obtener en la inversión en contadores, usualmente es un 5%.

También se requerirá el porcentaje del incremento de la inflación del país, realizando un promedio de los porcentajes mensuales del 2022, se obtiene un valor del 2.86%, extraído del Mapa de Información Económica de la República de Panamá (MIINERPA). Con estos datos se puede calcular la rentabilidad corregida(r'):

Aproximación del costo del abastecimiento de agua por abonado:

Partiendo de en promedio una habitante en la ciudad de Panamá consume 507 litros al día.

$$507 \frac{\text{lit}}{\text{personas} \cdot \text{día}} * 4 \frac{\text{personas}}{\text{Abonados}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.7854 \text{ lit}} * \frac{30 \text{ día}}{1 \text{ mes}} = 16,072.3 \frac{\text{gal}}{\text{mes}}$$

Al observar la tabla 1 que muestra las tarifas servicio de agua potable por bloque de consumo, este consumo promedio corresponde al bloque entre 16 a 20 Miles de galones al mes, en el cual la tarifa es de 1.51\$/Mil galones/mes.

$$C_{H_2O} \text{ al abonado} = \frac{1.51\$}{1000 \text{ gal}} * \frac{264.172 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3} = 0.4 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Pero este no es el costo de producción del agua, en el boletín estadístico del 2022 del IDAAN, muestra que el abastecimiento tiene una rentabilidad económica del -8.3%. Por lo que este porcentaje se utilizara como un coeficiente de mayoración para estimar el costo del agua para el abastecimiento:

$V_i =$ Consumo anual promedio =

$$507 \frac{\text{lit}}{\text{personas} * \text{día}} * 4 \frac{\text{personas}}{\text{Abonados}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lit}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 740.22 \frac{\text{m}^3}{\text{Abonado año}}$$

Coste del agua mayorado

$$C_{H_2O} \text{ mayorado} = 0.43 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Cálculo del Valor actual neto de contadores (VAN)

Ejemplo con el contador volumétrico USFlow:

(Ec.17)

Costes fijos

$$\text{Costes fijos} = -C \text{ comp} - C \text{ inst} - C \text{ adm}$$

Donde:

$$C_{comp} = \text{Coste de compra} = 39.99 \$$$

$$C_{inst} = \text{Coste de instalación} = 7 \$$$

$$C_{adm} = \text{Coste administrativo} = 2 \$$$

$$\text{Costes fijos} = -39.99 \$ - 7 \$ - 2 \$ = 48.99 \$$$

(Ec.18)

Tasa de actualización deflactada (r'):

$$r' = \frac{(1 + r)}{(1 + s)} - 1$$

Donde:

$$r = \text{Tasa de actualización nominal} = 5\% = 0.05$$

$$s = \text{Inflación anual} = 2.86\% = 0.0286$$

$$r' = \frac{(1 + 0.05)}{(1 + 0.0286)} - 1$$

$$r' = 0.021 = 2.1\%$$

(Ec.19)

Ingresos por agua registrada

$$\text{Ingresos por agua registrada} = \forall_i * (1 - (\varepsilon_i + \varepsilon_d)) \frac{C_{H2O \text{ real}}}{(1 + r')^{(i-1)}}$$

Donde:

$$i = \text{Tiempo de estudio}$$

$$\forall_i = \text{Consumo anual promedio} = 740.22 \frac{m^3}{\text{Abonado año}}$$

$$\varepsilon_i = \text{Porcentaje de error del contador inicial} = 3\% = 0.03$$

$$\varepsilon_d = \text{Incremento del deterioro del contador} = 0.3\%/\text{año} = 0.003$$

$$C_{H2O \text{ real}} = \text{Coste del agua de venta al publico} = 0.43 \frac{\$}{m^3}$$

$$r' = \text{Tasa de actualización defalactada} = 2.1\% = 0.021$$

Debido a que en el momento de la compra del contador no se conoce la tasa de degradación, se utilizaron valores aproximados (Arregui,2006), para realizar la comparación con los demás datos que intervienen.

Valor actual neto (VAN):

(Ec.20)

$$VAN = -Costes\ fijos + Ingresos\ acumulados\ por\ agua\ registrada$$

Tabla 26: Calculo del VAN para el contador volumétrico USFlow.

| Año | Incremento del ritmo de deterioro del contador (%) | Costes fijos (\$) | Volumen registrado (m3) | Ingresos por agua registrada en dolares constantes (\$) | Ingresos acumulados por agua registrada en dolares constantes (\$) | VAN de los ingresos (\$) |
|-----|--|-------------------|-------------------------|---|--|--------------------------|
| 1 | 0 | -48.99 | 740.22 | 357.5 | 357.5 | 308.5 |
| 2 | -0.30 | | 740.22 | 343.1 | 700.6 | 651.6 |
| 3 | -0.60 | | 740.22 | 337.1 | 1037.7 | 988.7 |
| 4 | -0.90 | | 740.22 | 331.1 | 1368.8 | 1319.9 |
| 5 | -1.20 | | 740.22 | 325.3 | 1694.2 | 1645.2 |
| 6 | -1.50 | | 740.22 | 319.6 | 2013.7 | 1964.7 |
| 7 | -1.80 | | 740.22 | 313.9 | 2327.7 | 2278.7 |
| 8 | -2.10 | | 740.22 | 308.4 | 2636.1 | 2587.1 |
| 9 | -2.40 | | 740.22 | 303.0 | 2939.1 | 2890.1 |
| 10 | -2.70 | | 740.22 | 297.6 | 3236.7 | 3187.7 |

El Valor actual neto para el contador volumétrico USFlow es de 3,187.7 \$.

Comparación del VAN entre contadores domésticos.

Tabla 27: Datos de los contadores domésticos.

| Tipo de medidor | Medidores domesticos | | |
|---|----------------------|-----------------|--------------|
| | Volumetrico | Chorro Múltiple | Chorro unico |
| Marca del medidor | USFlow | MT-KD | Atlantis |
| Precio compra (\$) | 39.99 | 201.69 | 29.99 |
| Coste de instalación (\$) | 7 | 7 | 7 |
| Coste administrativo (\$) | 2 | 2 | 2 |
| Error inicial (%) | -3 | -2 | -3 |
| Años de funcionamiento | 10 | 10 | 10 |
| Ritmo de deterioro del contador (%/año) | -0.30 | -0.30 | -0.30 |

Tabla 28: Cálculo del VAN para el contador de chorro múltiple MT-KD.

| Año | Incremento del ritmo de deterioro del contador (%) | Costes fijos (\$) | Volumen registrado (m3) | Ingresos por agua registrada en dolares constantes (\$) | Ingresos acumulados por agua registrada en dolares constantes (\$) | VAN de los ingresos (\$) |
|-----|--|-------------------|-------------------------|---|--|--------------------------|
| 1 | 0 | -210.69 | 740.22 | 354.1 | 354.1 | 143.4 |
| 2 | -0.30 | | 740.22 | 347.9 | 701.9 | 491.2 |
| 3 | -0.60 | | 740.22 | 341.8 | 1043.7 | 833.0 |
| 4 | -0.90 | | 740.22 | 335.8 | 1379.5 | 1168.8 |
| 5 | -1.20 | | 740.22 | 329.9 | 1709.4 | 1498.7 |
| 6 | -1.50 | | 740.22 | 324.1 | 2033.5 | 1822.8 |
| 7 | -1.80 | | 740.22 | 318.4 | 2351.9 | 2141.2 |
| 8 | -2.10 | | 740.22 | 312.8 | 2664.8 | 2454.1 |
| 9 | -2.40 | | 740.22 | 307.4 | 2972.1 | 2761.4 |
| 10 | -2.70 | | 740.22 | 302.0 | 3274.1 | 3063.4 |

El Valor actual neto para el contador de chorro múltiple MT-KD es de 3,063.4 \$.

Tabla 29: Cálculo del VAN para el contador de chorro único Atlantis.

| Año | Incremento del ritmo de deterioro del contador (%) | Costes fijos (\$) | Volumen registrado (m3) | Ingresos por agua registrada en dolares constantes (\$) | Ingresos acumulados por agua registrada en dolares constantes (\$) | VAN de los ingresos (\$) |
|-----|--|-------------------|-------------------------|---|--|--------------------------|
| 1 | 0 | -38.99 | 740.22 | 357.5 | 357.5 | 318.5 |
| 2 | -0.30 | | 740.22 | 351.3 | 708.8 | 669.8 |
| 3 | -0.60 | | 740.22 | 345.1 | 1053.9 | 1014.9 |
| 4 | -0.90 | | 740.22 | 339.1 | 1393.0 | 1354.0 |
| 5 | -1.20 | | 740.22 | 333.1 | 1726.1 | 1687.1 |
| 6 | -1.50 | | 740.22 | 327.2 | 2053.3 | 2014.3 |
| 7 | -1.80 | | 740.22 | 321.5 | 2374.8 | 2335.8 |
| 8 | -2.10 | | 740.22 | 315.8 | 2690.7 | 2651.7 |
| 9 | -2.40 | | 740.22 | 310.3 | 3000.9 | 2962.0 |
| 10 | -2.70 | | 740.22 | 304.8 | 3305.8 | 3266.8 |

El Valor actual neto para el contador de chorro único Atlantis es de 3,266.8 \$.

Al comparar los cálculos, se observa que el contador de chorro único Atlantis es la mejor opción económica para una instalación doméstica. Al comparar los resultados del VAN de cada uno, este es el que produce mayores ingresos netos al abastecimiento.

Comparación del VAN entre contadores no domésticos

Tabla 30: Datos de los contadores no domésticos.

| Tipo de medidor | Medidores no domesticos | |
|---|-------------------------|------------------|
| | Ultrasonico | Electromagnético |
| Marca del medidor | Traxco | Mca.Arkon |
| Precio compra (\$) | 888 | 2611.29 |
| Coste de instalación (\$) | 14 | 14 |
| Coste administrativo (\$) | 2 | 2 |
| Error inicial (%) | -4 | -2 |
| Años de funcionamiento | 15 | 15 |
| Ritmo de deterioro del contador (%/año) | -0.30 | -0.30 |

Tabla 31: Calculo del VAN para el contador ultrasónico Traxco.

| Año | Incremento del ritmo de deterioro del contador (%) | Costes fijos (\$) | Volumen registrado (m3) | Ingresos por agua registrada en dolares constantes (\$) | Ingresos acumulados por agua registrada en dolares constantes (\$) | VAN de los ingresos (\$) |
|-----|--|-------------------|-------------------------|---|--|--------------------------|
| 1 | 0 | -904 | 740.22 | 361.0 | 361.0 | -543.0 |
| 2 | -0.30 | | 740.22 | 346.4 | 707.4 | -196.6 |
| 3 | -0.60 | | 740.22 | 340.3 | 1047.8 | 143.8 |
| 4 | -0.90 | | 740.22 | 334.3 | 1382.1 | 478.1 |
| 5 | -1.20 | | 740.22 | 328.4 | 1710.6 | 806.6 |
| 6 | -1.50 | | 740.22 | 322.6 | 2033.2 | 1129.2 |
| 7 | -1.80 | | 740.22 | 317.0 | 2350.2 | 1446.2 |
| 8 | -2.10 | | 740.22 | 311.4 | 2661.5 | 1757.5 |
| 9 | -2.40 | | 740.22 | 305.9 | 2967.4 | 2063.4 |
| 10 | -2.70 | | 740.22 | 300.4 | 3267.8 | 2363.8 |
| 11 | -3.00 | | 740.22 | 295.1 | 3563.0 | 2659.0 |
| 12 | -3.30 | | 740.22 | 289.9 | 3852.9 | 2948.9 |
| 13 | -3.60 | | 740.22 | 284.8 | 4137.6 | 3233.6 |
| 14 | -3.90 | | 740.22 | 279.7 | 4417.4 | 3513.4 |
| 15 | -4.20 | | 740.22 | 274.8 | 4692.2 | 3788.2 |

El Valor actual neto para el contador ultrasónico Traxco es de 3,788.2 \$.

Tabla 32: Cálculo del VAN para el contador electromagnético Mca.Arkon.

| Año | Incremento del ritmo de deterioro del contador (%) | Costes fijos (\$) | Volumen registrado (m3) | Ingresos por agua registrada en dolares constantes (\$) | Ingresos acumulados por agua registrada en dolares constantes (\$) | VAN de los ingresos (\$) |
|-----|--|-------------------|-------------------------|---|--|--------------------------|
| 1 | 0 | -2627.29 | 740.22 | 354.1 | 354.1 | -2273.2 |
| 2 | -0.30 | | 740.22 | 347.9 | 701.9 | -1925.4 |
| 3 | -0.60 | | 740.22 | 341.8 | 1043.7 | -1583.6 |
| 4 | -0.90 | | 740.22 | 335.8 | 1379.5 | -1247.8 |
| 5 | -1.20 | | 740.22 | 329.9 | 1709.4 | -917.9 |
| 6 | -1.50 | | 740.22 | 324.1 | 2033.5 | -593.8 |
| 7 | -1.80 | | 740.22 | 318.4 | 2351.9 | -275.4 |
| 8 | -2.10 | | 740.22 | 312.8 | 2664.8 | 37.5 |
| 9 | -2.40 | | 740.22 | 307.4 | 2972.1 | 344.8 |
| 10 | -2.70 | | 740.22 | 302.0 | 3274.1 | 646.8 |
| 11 | -3.00 | | 740.22 | 296.6 | 3570.7 | 943.4 |
| 12 | -3.30 | | 740.22 | 291.4 | 3862.2 | 1234.9 |
| 13 | -3.60 | | 740.22 | 286.3 | 4148.5 | 1521.2 |
| 14 | -3.90 | | 740.22 | 281.3 | 4429.7 | 1802.4 |
| 15 | -4.20 | | 740.22 | 276.3 | 4706.0 | 2078.8 |

El Valor actual neto para el contador electromagnético Mca.Arkon es de 2,078.8 \$.

Al comparar los cálculos, se observa que el contador ultrasónico Mca.Arkon es la mejor opción económica para una instalación no doméstica. Al comparar los resultados del VAN de cada uno, este es el que produce mayores ingresos netos al abastecimiento.

9.7. CALIDAD DE LOS DATOS REQUERIDOS PARA LOS CÁLCULOS DE LA GESTIÓN DE CONTADORES

Los datos requeridos para cálculos de la gestión de contadores se asignó una clasificación de calidad alta (★★★), como la gran mayoría de los datos fueron publicados por las instituciones gubernamentales y por los fabricantes. También son datos actualizados, los resultados tienen valores esperables y coherentes a comparación de otros estudios. Las únicas variables aproximadas fueron los costes de instalación y administrativos, pero estos no tienen gran impacto en el resultado.

10. MODELADO DE LA RED DE UNA ZONA URBANA

10.1. CATASTROS DE SISTEMAS POTABLES

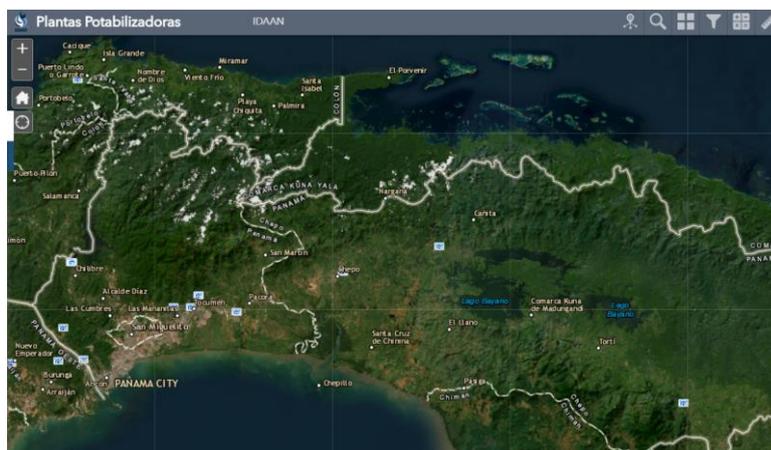
Un catastro es definido como un conjunto de datos, registros que facilita la ubicación y extracción de información del abastecimiento y sus elementos. Sus funciones son ser una herramienta estudio, valoración, formulación, estandarización de información, prevención de desperfectos, corroboración de operaciones, planificación de trabajos de mantenimiento y gestión del sistema. Este debe de contener las características de las tuberías, válvulas, contadores, medidores, bombas, depósitos, etc.

En la actualidad los catastros de redes de distribución se elaboran de manera digital ya que tiene la ventaja de proporcionar información de los elementos georreferenciados acompañados de datos reales de sus descripciones técnicas.

Actualmente la ciudad de Panamá no posee publicado un catastro digital de su sistema de abastecimiento cumpla con niveles de calidad suficientes para el entendimiento del sistema, lo cual puede dificultar los trabajos de operación y mantenimiento.

En diciembre del año 2022 el abastecimiento de la ciudad inauguró un plan de recolección de datos para la elaboración del catastro de residencias y abonados, estos subcontrataron las labores de digitalización, planificación, administrativos y económicos a la Sociedad General Aguas de Barcelona (SGAB). Se estima la culminación del proyecto en cinco años, pero se proyecta que SGAB continúe con los trabajos de optimización de la cantidad y calidad del agua. Actualmente en la página web del abastecimiento, el sistema de información geográfico únicamente ofrece datos sobre las potabilizadoras.

Figura 26: Sistema de información geográfico publicado por el IDAAN (PLATAFORMA SIG IDAAN, 2022).



En el presente trabajo se desea desarrollar un modelado de un sector del sistema con el fin de que este se pueda utilizar como acercamiento del estado presente de la red para contribuir con la población con el estudio de la red, apoyar al progreso y mejora de la ciudad, hasta que se publique el catastro estatal con los datos oficiales del abastecimiento.

10.2. JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del funcionamiento del sistema, sus demandas y fugas de la ciudad de Panamá se escogió un área representativa, esta fue el corregimiento de Calidonia ya que en esta posee los diversos tipos de uso de edificaciones, desde unifamiliares de una planta hasta rascacielos de 66 niveles, este corregimiento de la ciudad cuenta con 1.6 km² y con 19,108 habitantes.

10.2.1. Trazado de tuberías y ubicación de nudos

Para la modelación de la red se utilizó como referencia el plano de líneas potables, publicado por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), de este se extrajeron el trazado, el diámetro y las longitudes de las tuberías. Las líneas potables fueron trazadas al detalle utilizando polilíneas con el software AutoCAD. El trazado fue realizado contemplando que los nudos de consumo se ubicarían entre las intersecciones de las calles y las demandas asignadas serían las de los edificios adyacentes.

Figura 27: Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (2018), Planos de los acueductos potables del corregimiento de Calidonia.



Posteriormente se asignaron las cotas topográficas a los extremos de cada tubería, realizando el siguiente proceso:

- Se extrajeron numerosas cotas de superficie a utilizando el software de Google Earth, para insertarlas el Civil 3D y crear una “superficie” de forma que en cualquier coordenada se puede obtener una elevación. A todas las cotas se le resto 1.6 metros ya que, según las normas panameñas, esta es la profundidad mínima a la que las tuberías pueden estar de la superficie.
- Después se transformaron las polilíneas a líneas características, ya que con este formato incluye almacenar la coordenada en Z.
- Con la herramienta “editar” se insertaron elevaciones desde la superficie a las líneas características.
- Con el comando “descomponer” las líneas características se transformaron a polilíneas 3D.

Posteriormente se trasladó la red georreferenciada al programa de cálculo hidráulico “EPANET”, para ello se utilizó una extensión del Epanet llamada “CADaRED”. Para ello el software requiere importar el archivo de AutoCAD en formato “.dxf”. Las opciones utilizadas para la conversión fueron:

- El modo de Convertir la red se seleccionó que longitudes se calcularán automáticamente.
- Se asumió la componente Z de las polilíneas como cota.
- La importación polilíneas se realizó como líneas quebradas.
- La tolerancia mínima de unión de tuberías con nudos fue de 0.1 unidades de dibujo.

10.2.2. Determinación de demandas

La asignación de los caudales de consumo de cada nodo se decidió determinarla según el área de las superficies construidas de edificios residenciales, comerciales, piscinas y de zonas verdes. Se descartó calcularlo a partir del número de habitantes del corregimiento ya que los censos de población de la ciudad de Panamá solo toman en cuenta a los habitantes residenciales de la zona y no a las personas que se encuentran realizando actividades comerciales que también representa un consumo de agua considerable.

Lamentablemente el abastecimiento no ha realizado ni publicado los datos de la dotación específica según su uso de superficie, pero se extrapolaron utilizando datos internacionales y comparando el consumo promedio diario por persona.

Como referencia el último estudio del consumo promedio por persona al día en Panamá es de 507 litros según la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), mientras que en Madrid es de 140 litros según el Instituto Nacional de Estadística (INE); por lo que un habitante de la ciudad de Panamá consume 3.81 veces más que los de la comunidad de Madrid. Se utilizó el cuadro de dotaciones brutas medias para el conjunto del municipio de las normas para redes de abastecimiento de Madrid (Canal Isabel II) y se extrapolaron los consumos según el uso del suelo de la ciudad de Panamá.

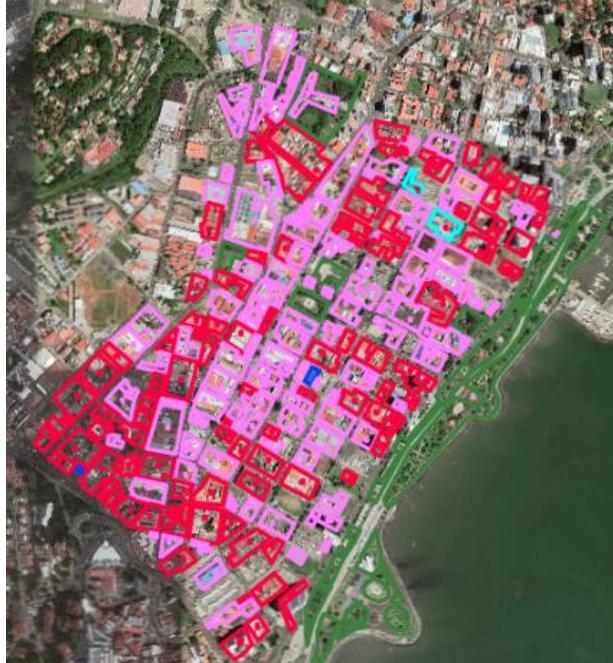
Tabla 33: Estimación de la dotación de consumo de agua según el uso del suelo de la ciudad de Panamá.

| USO DEL SUELO | DOTACIÓN (l/m ² /día) |
|------------------------|----------------------------------|
| Vivienda unifamiliar | 36.21 |
| Vivienda multifamiliar | 30.50 |
| Terciario/industrial | 30.50 |
| Zonas verdes | 1.50 |
| Piscinas | 10.00 |

El siguiente paso fue realizar un mapa en AutoCAD donde se visualizará y se extraerá la información de los metros cuadrados del uso de suelos y con ayuda de Google Earth se visualizó y registro los números de plantas de cada edificio.

Figura 28: Mapa con la delimitación de las superficies por uso de suelos en el corregimiento de Calidonia.

-  Vivienda unifamiliar.
-  Vivienda multifamiliar.
-  Terciario/Industrial.
-  Zonas verdes.
-  Piscinas.



Para cálculo del volumen de dotación de agua potable para cada consumo, se empleó la siguiente formula:

(Ec.21)

$$D_t = \sum [(A_i * n_i * d_i) / 86400]$$

Donde:

Di: Demanda zonal para el uso i (l/día).

ni: niveles de la infraestructura (unidad).

Ai: Superficie edificable o superficie según el uso i determinado (m²).

Di: Dotación específica según su uso (l/m²/día).

Una vez calculado se asignó la dotación de cada superficie a su nudo de consumo más cercano, cabe resaltar los consumos calculados se tratan de los consumos medios y no de caudal punta. A continuación, se presenta un listado de detalla la demanda de caudal en cada uno nudo.

Tabla 34: Asignación de las demandas a los nudos de consumo de la red.

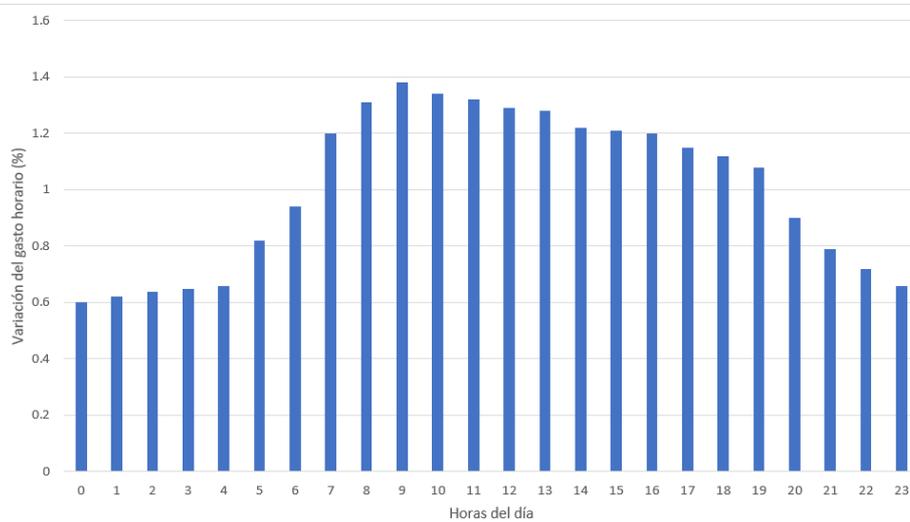
| ID Nudo | CAUDAL (l/s) |
|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| N1 | 16.90 | N49 | 11.84 | N96 | 1.46 | N150 | 11.03 |
| N2 | 15.83 | N50 | 4.77 | N98 | 4.17 | N151 | 4.51 |
| N4 | 0.52 | N51 | 31.98 | N99 | 6.35 | N153 | 7.40 |
| N5 | 0.53 | N52 | 1.00 | N100 | 4.76 | N154 | 2.83 |
| N6 | 0.81 | N54 | 6.17 | N101 | 6.63 | N155 | 4.00 |
| N7 | 8.43 | N57 | 29.75 | N103 | 3.56 | N157 | 8.79 |
| N8 | 3.44 | N58 | 8.85 | N104 | 5.74 | N159 | 8.74 |
| N9 | 48.86 | N59 | 6.11 | N105 | 4.07 | N160 | 4.00 |
| N10 | 34.08 | N60 | 6.45 | N107 | 25.32 | N162 | 12.22 |
| N11 | 76.28 | N61 | 3.82 | N109 | 1.23 | N163 | 6.08 |
| N12 | 62.27 | N62 | 7.88 | N110 | 2.50 | N164 | 7.48 |
| N13 | 16.89 | N64 | 6.73 | N112 | 5.35 | N165 | 41.42 |
| N15 | 20.69 | N66 | 8.60 | N113 | 1.07 | N169 | 6.91 |
| N16 | 2.19 | N67 | 10.70 | N114 | 0.36 | N170 | 27.48 |
| N17 | 5.59 | N68 | 10.95 | N115 | 13.94 | N171 | 12.20 |
| N20 | 4.95 | N69 | 5.82 | N116 | 4.64 | N172 | 4.36 |
| N23 | 5.49 | N70 | 11.06 | N117 | 1.62 | N174 | 7.11 |
| N24 | 8.27 | N71 | 11.67 | N118 | 16.35 | N175 | 5.73 |
| N25 | 0.01 | N72 | 2.71 | N119 | 11.83 | N178 | 9.64 |
| N27 | 2.83 | N73 | 7.47 | N120 | 0.76 | N179 | 4.66 |
| N28 | 3.33 | N74 | 3.97 | N124 | 7.47 | N180 | 2.43 |
| N29 | 3.59 | N75 | 19.38 | N126 | 9.41 | N182 | 1.23 |
| N30 | 4.00 | N76 | 24.71 | N127 | 0.29 | N186 | 6.07 |
| N31 | 6.85 | N77 | 0.12 | N128 | 5.04 | N187 | 5.80 |
| N32 | 11.40 | N79 | 1.97 | N129 | 34.08 | N188 | 6.25 |
| N33 | 4.45 | N80 | 5.80 | N130 | 29.27 | N190 | 6.08 |
| N34 | 3.65 | N81 | 1.00 | N135 | 8.90 | N191 | 6.20 |
| N35 | 3.97 | N83 | 12.42 | N137 | 2.43 | N192 | 9.49 |
| N37 | 0.97 | N84 | 1.37 | N140 | 3.50 | N193 | 3.31 |
| N38 | 6.96 | N87 | 8.77 | N141 | 15.77 | N194 | 8.93 |
| N40 | 30.16 | N88 | 7.85 | N142 | 10.18 | N195 | 17.07 |
| N41 | 6.89 | N89 | 6.24 | N143 | 13.66 | | |
| N42 | 6.80 | N90 | 4.12 | N145 | 3.93 | | |
| N43 | 0.10 | N92 | 4.00 | N147 | 3.27 | | |
| N44 | 15.49 | N95 | 2.45 | N149 | 9.97 | | |

En el Anexo 1 se muestra los datos detallados del cálculo de las dotaciones.

10.2.3. Asignación de patrón de consumo

Lastimosamente, el abastecimiento a la fecha no ha publicado un estudio el cual estime un patrón de consumo horario de la ciudad de Panamá. Con el fin de realizar un modelo más realista se utilizó el patrón de consumo de la ciudad de México la cual tiene consumos similares a la de la ciudad de Panamá. A continuación, se muestra el grafico del patrón utilizado:

Gráfico 7: Patrón de consumo horario utilizado en el modelado de la red de ciudad de Panamá.

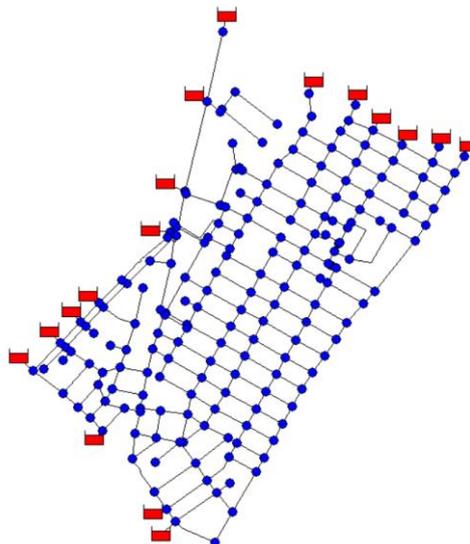


En EPANET este consumo horario fue introducido y asignado como patrón determinado de todos los nudos de la red.

10.2.4. Posicionamiento de embalses

En el plano publicado por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), no muestra que la red posea depósitos ni estaciones de bombeo, por lo que esta es presurizada mediante las redes de los corregimientos vecinos, por lo que se añadieron embalses en todos los puntos donde limita la red de Calidonia con las adyacentes.

Figura 29: Posicionamiento de los embalses del modelado de la red de Calidonia.



A falta de información del abastecimiento sobre las presiones medias del sistema o de las redes vecinas, se asignaron las alturas a los embalses de tal forma que cumpla con los estándares mínimos de la normativa del diseño de acueductos de Panamá, siendo que en todos los nudos tengan una presión mínima de 14 m.c.a.

Para lograr un modelo que funcione en cualquier situación posible, se tomó en cuenta que la red debe cumplir con la presión mínima mencionada en el caso de incendios, cabe resaltar que en los planos tampoco muestra el diámetro correspondiente a los hidrantes, por lo que en esta hipótesis se supuso que utilizan el hidrante de mayor diámetro que mencionan las normas panameñas, el cual es de 150 mm; este posee una demanda de caudal de 1000 l/min o 16.67 l/seg. Esta demanda fue asignada nodo a nodo (desde los de menor presión mínima a mayor), para asegurar que el sistema opere con la presión mínima mencionada en caso de un incendio.

10.2.5. Adición de fugas a la red

Con la finalidad de entender la cantidad de agua fugada en los distintos puntos de la red y de sus impactos medioambientales, se simularon los caudales de fugas como emisores. La definición de un emisor es de aquel flujo de salida en que su caudal dependerá directamente de la presión de dicho punto. Utilizando los datos más recientes del balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 (Tabla 5), el porcentaje de perdidas reales con respecto al volumen total inyectado es de un 7%. Para modelar los emisores se requiere previamente el valor del coeficiente de emisor, el cual es un valor característico:

(Ec.22)

$$C_e = * \frac{Q_f}{(P)^a}$$

Q_f = Caudal de fuga. (l/s)

C_e = Coeficiente emisor. (m)

P = Presión en el nudo (m.c.a.)

a = Exponente de emisor.

El exponente de emisor representa la variabilidad del caudal del emisor debido a los cambios de presión, se utiliza un valor entre 0.5 y 1. Mientras mayor sea este valor el flujo tenderá a ser laminar y mientras sea menor tenderá a flujos turbulentos. Como normalmente los sistemas potables a presión trabajan con flujos turbulentos, se optó por utilizar un el exponente del emisor es 0.5 para asegurar que simule este tipo de flujo.

Para estimar el porcentaje de fugas (%Fugas) del caudal fugado de la red se utilizó la Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 en millones de galones/año), para ello se dividió el volumen de perdidas aparentes con el volumen inyectado.

(Ec.23)

$$\% \text{ Fugas} = \frac{\text{Volumen de perdidas reales}}{\text{Volumen inyectado}}$$

$$\% \text{ Fugas} = \frac{6990.76 \text{ mgal}}{97145.7 \text{ mgal}}$$

$$\% \text{ Fugas} = 0.072 = 7.2\%$$

El caudal fugado se calculó multiplicando el caudal promedio demandado de la red (extraído de los resultados proporcionados de la simulación de EPANET) por el porcentaje de fugas:

(Ec.24)

$$Q_f = (\text{caudal promedio demandado} * \% \text{ Fugas})$$

$$Q_f = (1295.7 * 0.072) = 93.29 \text{ l/s}$$

$$Q_f = 93.29 \text{ l/s}$$

Al realizar un promedio de temporal de todos los nudos de la red estos trabajan a una presión media a 42.54 m.c.a.

Con ello obtiene el coeficiente emisor global de la red:

(Ec.25)

$$C_e \text{ global} = * \frac{Q_f}{(\text{Presión media de los nudos})^n}$$

Donde:

Qf = Caudal fugado (lit/s)

n = Exponente emisor

Presión media de los nudos (m.c.a.)

$$C_e \text{ global} = \frac{93.29 \frac{\text{lit}}{\text{s}}}{(42.54 \text{ m. c. a.})^{0.5}}$$

$$C_e \text{ global} = 14.3$$

Este valor a cada nudo es necesario dividir el coeficiente emisor global con la cantidad de nudos en la red.

(Ec.26)

$$C_e = \frac{C_e \text{ global}}{\# \text{ nudos}}$$

$$C_e = \frac{14.3}{194 \text{ nudos}}$$

$$C_e = 0.0737$$

Al introducir este valor a la red se observa puntos donde no se cumple la presión mínima establecida por las normas panameñas, por lo que se incrementaron las alturas de los embalses de las redes vecinas para corregirlo.

10.2.6. Estudio de roturas en la red

Se corroboró que la red pueda abastecer las demandas de forma adecuada en el escenario del fallo de una tubería. Este estudio se realizó en Epanet, donde en las simulaciones se cerraron los tramos uno a uno, desde las tuberías en las que fluyen mayor caudal a las de menor. En el caso de no cumplirla se incrementaron las alturas de los embalses hasta cumplir con la presión mínima de 14 m.c.a.

10.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA RED

10.3.1. Estudio de velocidades

Las normativas panameñas no establecen una velocidad máxima del flujo en las tuberías, sin embargo, esta debe de ser tomada en cuenta; ya que las velocidades excesivas incrementan el riesgo de fallas producidas por golpes de ariete y el desgaste por erosión. Se utilizó el parámetro utilizado por la normativa de Madrid (Canal Isabel II) donde la velocidad máxima de una conducción se establece con la fórmula:

(Ec.27)

$$v_{max} = 1.5 * \frac{0.013}{n} * \sqrt{(ID + 0.05)}$$

Donde:

v max = Velocidad máxima de circulación del agua

ID = Diámetro interior de la conducción (m)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning = 0.017 (para hierro fundido).

A continuación, se adjuntaron el resumen en tablas del cumplimiento de las velocidades máximas para cada tubería:

Tabla 35: Estudio de las velocidades de las tuberías de la red de Calidonia.

| ID Línea | Velocidad máxima registrada | Velocidad máxima permitida | Comentario | ID Línea | Velocidad máxima registrada | Velocidad máxima permitida | Comentario |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|------------|
| | m/s | m/s | | Tubería L142 | 1.66 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L1 | 1.72 | 0.45 | NO Cumple | Tubería L143 | 1.87 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L10 | 2.44 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L144 | 1.25 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L100 | 0.15 | 0.52 | OK | Tubería L145 | 0.8 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L101 | 0.22 | 0.52 | OK | Tubería L146 | 1.19 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L102 | 0.63 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L147 | 0.63 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L103 | 0.39 | 0.52 | OK | Tubería L148 | 2.24 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L104 | 0.03 | 0.52 | OK | Tubería L149 | 0.97 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L105 | 0.65 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L15 | 2.29 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L106 | 0.29 | 0.52 | OK | Tubería L150 | 3.25 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L107 | 0.4 | 0.52 | OK | Tubería L151 | 3.24 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L108 | 0.11 | 0.52 | OK | Tubería L152 | 1.01 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L109 | 0.13 | 0.52 | OK | Tubería L153 | 2 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L11 | 0.36 | 0.52 | OK | Tubería L154 | 2.07 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L110 | 0.59 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L155 | 1.21 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L111 | 0.41 | 0.52 | OK | Tubería L156 | 1.58 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L112 | 0.13 | 0.52 | OK | Tubería L157 | 0.59 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L113 | 0.26 | 0.52 | OK | Tubería L158 | 1.37 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L114 | 0.47 | 0.52 | OK | Tubería L159 | 1.98 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L115 | 0.05 | 0.52 | OK | Tubería L16 | 0.7 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L116 | 1.15 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L160 | 4.01 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L117 | 0.3 | 0.52 | OK | Tubería L161 | 0 | 0.52 | OK |
| Tubería L118 | 1.15 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L162 | 3.08 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L119 | 0.07 | 0.52 | OK | Tubería L163 | 0.86 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L12 | 2.77 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L164 | 0.8 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L120 | 0.17 | 0.52 | OK | Tubería L165 | 1.85 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L121 | 0.61 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L166 | 0.32 | 0.52 | OK |
| Tubería L122 | 0.15 | 0.52 | OK | Tubería L167 | 4.82 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L123 | 0.2 | 0.52 | OK | Tubería L168 | 2.58 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L124 | 2.6 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L169 | 0.78 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L125 | 0.66 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L17 | 0.82 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L126 | 0.47 | 0.52 | OK | Tubería L170 | 1.77 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L127 | 0.25 | 0.52 | OK | Tubería L171 | 2.07 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L128 | 0.09 | 0.52 | OK | Tubería L172 | 1.17 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L129 | 1.09 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L173 | 1.5 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L13 | 0.18 | 0.52 | OK | Tubería L174 | 2.36 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L130 | 0.79 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L175 | 1.98 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L131 | 0.36 | 0.52 | OK | Tubería L176 | 2.39 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L132 | 1.09 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L177 | 0.28 | 0.52 | OK |
| Tubería L133 | 1.9 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L178 | 1.76 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L134 | 1.5 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L179 | 1.2 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L135 | 0.5 | 0.52 | OK | Tubería L18 | 2.18 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L136 | 1.38 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L180 | 1.16 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L137 | 1.14 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L181 | 2.35 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L138 | 0.47 | 0.52 | OK | Tubería L182 | 0.59 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L139 | 1.12 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L183 | 0.87 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L14 | 0.83 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L184 | 2.06 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L140 | 0.35 | 0.52 | OK | Tubería L185 | 1.95 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L141 | 0.7 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L186 | 0.52 | 0.52 | NO Cumple |
| | | | | Tubería L187 | 2.14 | 0.52 | NO Cumple |

| ID Línea | Velocidad maxima registrada | Velocidad maxima permitida | Comentario | ID Línea | Velocidad maxima registrada | Velocidad maxima permitida | Comentario |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|
| Tubería L188 | 0.7 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L279 | 0.49 | 0.93 | OK |
| Tubería L189 | 2.97 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L28 | 0.4 | 0.52 | OK |
| Tubería L190 | 3.12 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L280 | 0.38 | 0.93 | OK |
| Tubería L191 | 3.3 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L281 | 0.12 | 0.93 | OK |
| Tubería L192 | 8.5 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L282 | 0.05 | 0.93 | OK |
| Tubería L193 | 3.18 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L283 | 0.02 | 0.93 | OK |
| Tubería L194 | 3.8 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L29 | 1.21 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L195 | 0.03 | 0.52 | OK | Tubería L30 | 0.2 | 0.52 | OK |
| Tubería L196 | 0.02 | 0.52 | OK | Tubería L31 | 1.81 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L197 | 0.54 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L32 | 1.03 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L198 | 1.09 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L33 | 0.18 | 0.52 | OK |
| Tubería L199 | 1.11 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L34 | 1.95 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L2 | 1.03 | 0.45 | NO Cumple | Tubería L35 | 0.02 | 0.52 | OK |
| Tubería L20 | 5.61 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L36 | 0.27 | 0.52 | OK |
| Tubería L200 | 0.72 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L37 | 0.88 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L201 | 0.24 | 0.58 | OK | Tubería L38 | 1.67 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L202 | 0.3 | 0.58 | OK | Tubería L39 | 0.53 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L203 | 0.26 | 0.58 | OK | Tubería L40 | 1.56 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L204 | 0.73 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L41 | 0.18 | 0.52 | OK |
| Tubería L205 | 0.33 | 0.58 | OK | Tubería L42 | 1.14 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L206 | 0.19 | 0.58 | OK | Tubería L43 | 0.2 | 0.52 | OK |
| Tubería L207 | 0.29 | 0.58 | OK | Tubería L44 | 0.88 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L208 | 0.29 | 0.58 | OK | Tubería L45 | 0.63 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L209 | 0.25 | 0.58 | OK | Tubería L46 | 3.87 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L21 | 1.59 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L47 | 3.32 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L210 | 0.29 | 0.58 | OK | Tubería L48 | 2.29 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L211 | 0.41 | 0.58 | OK | Tubería L49 | 1.94 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L212 | 0.02 | 0.58 | OK | Tubería L50 | 0.53 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L213 | 0.67 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L51 | 0.23 | 0.52 | OK |
| Tubería L214 | 1.15 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L52 | 0.56 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L215 | 1.71 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L53 | 0.03 | 0.52 | OK |
| Tubería L216 | 2.09 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L54 | 0.6 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L217 | 3.37 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L55 | 0.11 | 0.52 | OK |
| Tubería L218 | 1.5 | 0.58 | NO Cumple | Tubería L56 | 0.5 | 0.52 | OK |
| Tubería L219 | 0.01 | 0.58 | OK | Tubería L57 | 0.92 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L22 | 1 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L58 | 0.82 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L220 | 4.49 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L59 | 1.43 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L221 | 3.3 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L6 | 1.33 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L222 | 5.93 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L60 | 0.14 | 0.52 | OK |
| Tubería L223 | 2.71 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L61 | 0.67 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L224 | 2.17 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L62 | 0.87 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L225 | 0.35 | 0.63 | OK | Tubería L63 | 1.11 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L226 | 1.59 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L64 | 0.06 | 0.52 | OK |
| Tubería L227 | 2.88 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L65 | 0.84 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L228 | 1.87 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L66 | 0.66 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L229 | 0.54 | 0.63 | OK | Tubería L67 | 0.5 | 0.52 | OK |
| Tubería L23 | 0.64 | 0.52 | NO Cumple | Tubería L68 | 0.82 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L230 | 1.34 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L69 | 1.05 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L231 | 1.11 | 0.63 | NO Cumple | Tubería L7 | 3.57 | 0.52 | NO Cumple |
| Tubería L232 | 0.26 | 0.63 | OK | Tubería L70 | 0.13 | 0.52 | OK |

| ID Línea | Velocidad maxima registrada | Velocidad maxima permitida | Comentario | ID Línea | Velocidad maxima registrada | Velocidad maxima permitida | Comentario |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|
| Tubería L71 | 0.69 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 20 | 0.05 | 1.18 | OK |
| Tubería L72 | 1.5 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 21 | 0.47 | 1.18 | OK |
| Tubería L73 | 1.39 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 22 | 0.2 | 1.18 | OK |
| Tubería L74 | 0.44 | 0.52 | OK | Tubería 23 | 0.09 | 1.18 | OK |
| Tubería L75 | 0.39 | 0.52 | OK | Tubería 24 | 0.08 | 1.18 | OK |
| Tubería L76 | 3.44 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 25 | 0.14 | 1.18 | OK |
| Tubería L77 | 1.08 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 26 | 0.17 | 1.18 | OK |
| Tubería L78 | 0.98 | 0.52 | NO Cumple | Tubería 27 | 0.15 | 1.18 | OK |
| Tubería L79 | 0.33 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L8 | 2.4 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L80 | 1.51 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L81 | 0.41 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L82 | 0.42 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L83 | 0.29 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L84 | 0.31 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L85 | 0.72 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L86 | 0.31 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L87 | 0.48 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L88 | 0.45 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L89 | 0.59 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L9 | 2.18 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L90 | 2.39 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L91 | 3.34 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L92 | 0.21 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L93 | 0.62 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L94 | 2.56 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L95 | 1.25 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L96 | 2.53 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L97 | 0.79 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería L98 | 0.08 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería L99 | 0.22 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería 1 | 0.01 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 2 | 1.68 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 3 | 4.02 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 4 | 3.04 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 5 | 0 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería 6 | 2.53 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 7 | 3.66 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 8 | 4.39 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 9 | 3.84 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 10 | 0.49 | 0.52 | OK | | | | |
| Tubería 11 | 3.38 | 0.52 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 12 | 0.06 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 13 | 0.12 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 14 | 0.31 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 15 | 0.97 | 0.68 | NO Cumple | | | | |
| Tubería 16 | 0.08 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 17 | 0 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 18 | 0.23 | 1.18 | OK | | | | |
| Tubería 19 | 0.14 | 1.18 | OK | | | | |

En resumen 119 tramos de tuberías (el 39%) cumplieron con la velocidad máxima recomendada por la expresión Mougny-Manning, mientras que 187 tramos del sistema (el 61%) operan picos de velocidades momentáneos que sobrepasan la recomendada. Esta situación puede ser causada por el aumento de la población y por consiguiente un aumento de la demanda de los abonados, en la presión del sistema y de la velocidad del flujo. Esta es una de las redes más antiguas de la ciudad (aproximadamente cuenta con más de 50 años), por lo que sus diámetros no son suficientes para cumplir la presión mínima de suministro y a la vez estar por debajo de las velocidades máximas recomendadas. Otro factor a tomar en cuenta es que en el momento de su diseño este parámetro pudo no ser tomado en cuenta ya que la normativa panameña no establecía ningún límite de velocidad del flujo para el diseño de abastecimientos de sistemas potables. Actualmente tampoco lo establece, por lo que no surge la necesidad de renovar las normativas panameñas a la vez que la red de distribución.

10.3.2. Diagnóstico de las fugas de la red

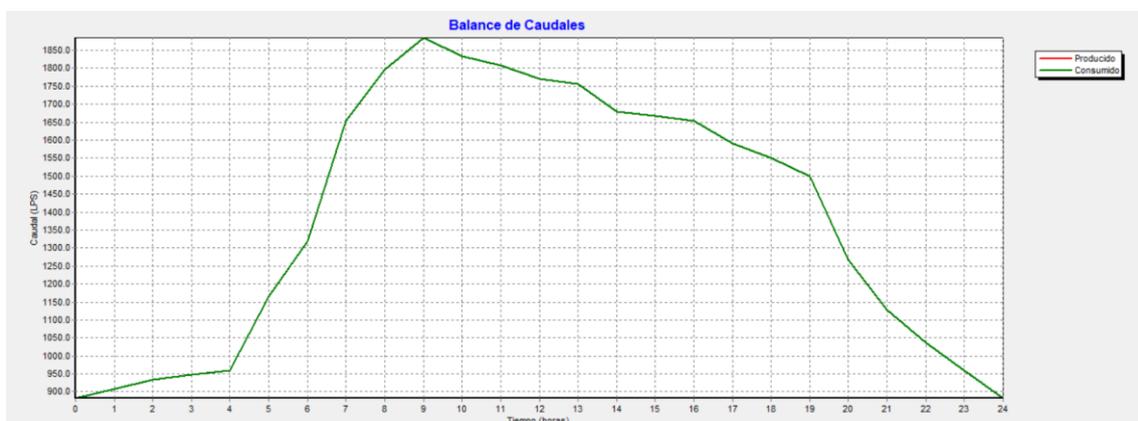
Una vez completado el modelo se determinó el caudal aproximado de fugas diario, para ello se realizó una comparación de la misma red con y sin los emisores operando. Como resultado del estudio durante tres días la red con emisores demandó en promedio 1,395.9 l/s, mientras que la red sin ellos demandó 1,296.88 l/s; lo que quiere decir que 99.02 l/s fueron fugados.

Adicionalmente cabe resaltar que al observar los datos proporcionados del balance hídrico del año 2022, donde las pérdidas reales representan un 7.2% del agua inyectada de la red, además del 5.94 que se estimó como valor del valor de fugas estructurales (ILI) el cual se encuentra por encima de la media de otros abastecimientos. Por lo que queda claro que es necesario implementar un programa de sustituciones de tuberías a la vez que uno de localización y reparación de fugas.

10.3.3. Balance de caudales de la red

Según la simulación realizada, la red de Calidonia tiene un pico de consumo de caudal de 1885 l/s a las 9:00 y un valle de demanda de 882 l/s a las 0:00. La evolución del caudal fue representada en el siguiente gráfico.

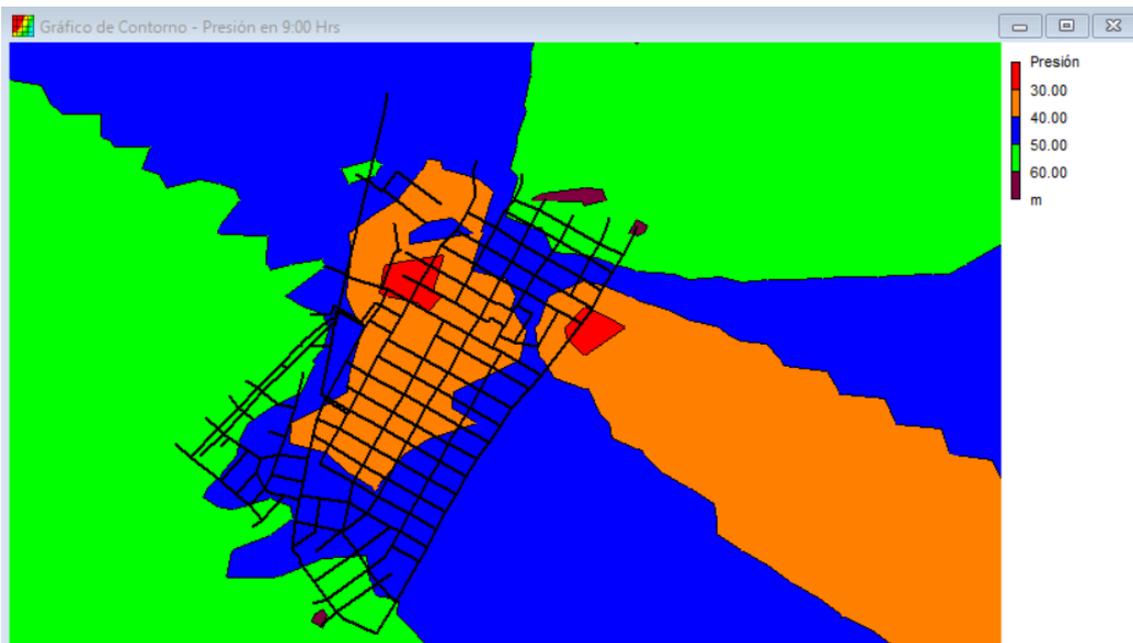
Gráfico 8: Evolución del caudal consumido en la red.



10.3.4. Mapa de presiones

Debido a las condiciones del terreno, la diferencia de cotas y a las significativas diferencias de las demandas, se observa una gran variedad de presiones en los nudos de la red. Para su análisis se extrajo un gráfico de contorno de presiones durante la hora de mayor consumo (9:00), donde en los extremos de la red se aprecia las mayores presiones de trabajo, mientras que de color rojo se aprecia las dos áreas de menores presiones.

Figura 30: Mapa del gráfico de contorno de presión en hora de mayor demanda de la red.



10.3.5 Calidad de los datos requeridos para la modelación del sistema potable de la ciudad de Panamá

Los datos requeridos para la modelación del sistema potable de la ciudad de Panamá de calidad baja (★), debido a que se requirió realizar suposiciones para su elaboración, entre estas están las cotas de elevación de las tuberías, las aturas de los embalses, caudales de demanda, patrones de consumo y coeficientes emisores.

11. RESUMEN DE LA CALIDAD DE LOS DATOS EN CADA APARTADO

Se realizó un cuadro comparativo de las calificaciones dadas a la calidad de los datos utilizados en los apartados del presente trabajo.

Tabla 36: Resumen de la valoración de la calidad de datos en cada apartado.

| Apartado | Calificación de datos | Simbología con estrellas |
|---|-----------------------|--------------------------|
| Planos de las redes potables | Baja | ★ |
| Balances hídricos | Regular | ★★ |
| Indicadores de desempeño | Regular | ★★ |
| Optimización | Regular | ★★ |
| Gestión de contadores | Alta | ★★★ |
| Modelación de un área representativa del sistema potable de la ciudad de Panamá | Baja | ★ |

Al promediar las evaluaciones de cada sección, resulta en una clasificación general de 1.8 estrellas, por lo que se puede valorar que los datos suministrados por el abastecimiento se valorarían entre calidad baja y regular.

12. CONCLUSIONES

La ciudad de Panamá goza de una buena seguridad hídrica, al poseer abundantes eventos de precipitaciones a lo largo del año y teniendo a su disposición numerosas fuentes de aguas superficiales para su posterior potabilización. Esto ha conllevado a que haya una falta de conciencia social hacia los recursos hídricos, provocando la contaminación de ríos y el despilfarro del consumo de los abonados. Además, algunos sectores de la ciudad que no disponen del servicio de abastecimiento continuo por diversos factores, pero principalmente por fallos en los componentes del sistema causados por el agotamiento del tiempo de vida de los materiales, la falta de mantenimiento y sustitución de los elementos de las redes.

Al examinar a detalle los planos de las redes de distribución del sistema potable de la ciudad, se han encontrado numerosas deficiencias en su diseño, dando paso a problemáticas como la imposibilidad de su entendimiento del funcionamiento hidráulico por falta de información, en ciertas circunstancias no se logra asegurar la continuidad, mayor dificultad en trabajo de reparaciones o mantenimiento, calidad y cantidad del servicio.

Se ha observado la importancia de que cada abastecimiento realice un balance hídrico, ya que este ofrece una vista general sobre la repartición del recurso y valorar la eficacia de su distribución. En las publicaciones anuales del funcionamiento de abastecimiento de la ciudad de Panamá no aportan dicho balance ni los datos necesarios para realizarlo, por lo que para realizarlo se requirió utilizar extrapolaciones y aproximaciones. Es necesario que en la ciudad de Panamá se elabore dicho estudio con el objetivo de comprender la situación actual y tomar decisiones para mejorar las deficiencias del sistema.

Tras someter al abastecimiento a un análisis con distintos indicadores de desempeño, donde al utilizar indicadores porcentuales se observó que hasta el año 2021 estuvo mejorando la eficiencia de distribución y medición, pero en el 2022 está empeorando significativamente. Con el indicador relativo por longitud de red se pudo identificar que el abastecimiento posee importantes pérdidas de agua y requiere de un mayor mantenimiento. Con el índice de fugas estructurales se logró comparar el funcionamiento con otros 19 abastecimientos y el de la ciudad de Panamá se colocó con el de mayores problemas de eficiencia en la gestión del recurso.

Se mencionaron las principales causas y consecuencias de las fugas en las redes de la ciudad, por lo que se realizó un estudio de optimización de las mismas, esta consistió en un control activo de las pérdidas de agua con detecciones, reparaciones y mantenimientos. Realizando los cálculos correspondientes se obtuvo que el porcentaje de red a inspeccionar al año es de un 82.95%, equivalentes a 4,539.02 km de tuberías.

Se realizó un estudio de eficiencia económica de los contadores utilizados por el abastecimiento, donde estimando un tiempo de vida de 10 años se calculó el valor actual neto de cada uno. Entre los domésticos se compararon un modelo volumétrico, de chorro múltiple y de chorro único, resultando que el contador de chorro único genera mayores ganancias. Y en la evaluación de un tiempo de vida de 15 años entre el contador no doméstico ultrasónico y el electromagnético, el primero fue la mejor elección económica.

Para mejorar el entendimiento del funcionamiento de las redes de la ciudad se seleccionó y modeló un área representativa en el software de cálculo hidráulico EPANET, donde se ubicaron geográficamente el trazado de las tuberías, se asignó las demandas de agua según el tipo de

cada edificación, se calculó un coeficiente emisor para ubicar en cada nodo las fugas estimadas de la red, se aproximó un patrón de demanda y las presiones de abastecimientos suficientes para cumplir con las normas panameñas. Al realizar la simulación se comprobó que con el diseño actual el sistema no puede cumplir al mismo tiempo las presiones mínimas de servicio y las velocidades máximas recomendadas por normas internacionales; lo que deja claro que es necesaria una actualización del sistema acordes a las demandas actuales del área.

En la valoración realizada a los datos proporcionados por el abastecimiento se clasificó entre una calidad baja y regular, lo que evidencia que la institución requiere de mejorar su sistema de recolección y publicación de datos. Optimizar la información del sistema con datos confiables y actualizados permitiría realizar mejores decisiones en su gestión; además que es necesario sean lo más transparente posible al ser una institución gubernamental, se podría llegar a promover la participación ciudadana ante las problemáticas al mejorar la calidad de las divulgaciones elaboradas por la entidad.

13. REFERENCIAS

13.1. FIGURAS

Figura 1: Mapamundial.co 2015, ubicación geográfica de Panamá, <https://mapamundial.co/m/mapadePanama>. Ubicación geográfica de Panamá.

Figura 2: Milenioscuro (2013), Ubicación geográfica de la ciudad de Panamá., https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Panam%C3%A1_-_Panam%C3%A1_-_Panam%C3%A1.svg.

Figura 3: Ministerio de vivienda y ordenamiento territorial, Revisión y Actualización del Plan de Desarrollo Urbano de las Áreas Metropolitanas del Pacífico y del Atlántico (2015), Mapa con las principales líneas de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Panamá.

Figura 4: Instituto de Acueductos y Alcantarillados nacionales (2019) Mapa de las infraestructuras principales de la ciudad de Panamá. https://www.prensa.com/impresia/economia/Idaan-planea-nuevas-lineas-ciudad_0_2582741802.html.

Figura 5: IDAAN HUB ARCGIS (2022), Planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 1), <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 6: IDAAN HUB ARCGIS (2022), planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 2), <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 7: IDAAN HUB ARCGIS (2022), planta potabilizadora Pacora, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 8: IDAAN HUB ARCGIS (2022), planta potabilizadora Miraflores, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 9: IDAAN HUB ARCGIS (2022), planta potabilizadora Cabra 1, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 10: IDAAN HUB ARCGIS (2022), planta potabilizadora Cabra 2, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>.

Figura 11: Planos de línea potable del distrito de 24 de diciembre,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 12: Planos de línea potable del distrito de 24 de San Francisco,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 13: Planos de línea potable del distrito de Bethania, <https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 14: Vista con satélite de un sector del distrito de Bethania,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 15: Planos de línea potable del distrito de 24 de diciembre,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 16: Planos de línea potable del distrito de San Francisco,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 17: Ejemplo de diseño donde se evita utilizar uniones en cruz,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 18: Planos de línea potable del distrito de Bella Vista, <https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 19: Planos de línea potable del distrito de Juan Días, <https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 20: Planos de línea potable del distrito de San Francisco,
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 21: Medidor volumétrico de agua dn15 usflow de de 1/2",
<https://www.panamacompra.gob.pa/Inicio/#/busqueda-avanzada-v2?q=eyJudW1MYyI6IjIwMjItMi02Ni0wLTA4LUNNLTAxOTUwMSJ9>

Figura 22: MT-KD Medidor de Chorro Múltiple de 1/2",
<https://www.panamacompra.gob.pa/Inicio/#/busqueda-avanzada-v2?q=eyJudW1MYyI6IjIwMjEtMi02Ni0wLTA4LUxQLTAxNzY0NiJ9>

Figura 23: Medidor de chorro único de transmisión magnética. Atlantis 1/2",
<https://www.panamacompra.gob.pa/Inicio/v2/#!/vistaPreviaCP?NumLc=2022-2-66-0-08-CM-019914&esap=0&nnc=1&it=1>

Figura 24: Medidor ultrasonico 4" Traxco.
<https://www.panamacompra.gob.pa/Inicio/v2/#!/vistaPreviaCP?NumLc=2022-2-66-0-08-LP-019941&esap=0&nnc=1&it=1>

Figura 25: Medidor Electromagnético Mca.Arkon 4", Rime MAGB1-100.
<https://www.panamacompra.gob.pa/Inicio/#/busqueda-avanzada-v2?q=eyJudW1MYyI6IjIwMjEtMi02Ni0wLTA4LUNNLTAxODkyMSJ9>

Figura 26: PLATAFORMA SIG IDAAN, 2022. Sistema de información geográfico publicado por el IDAAN. <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/>

Figura 27: Planos de los acueductos potables del corregimiento de Calidonia.
<https://www.idaan.gob.pa/planos-de-acueducto-distrito-de-panama/>

Figura 28: Mapa con la delimitación de las superficies por uso de suelos en el corregimiento de Calidonia.

Figura 29: Posicionamiento de los embalses del modelado de la red de calidonia.

Figura 30: Mapa del gráfico de contorno de presión en hora de mayor demanda de la red.

13.2. GRÁFICOS

Gráfico 1: Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica 2016. Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos. Panamá, República de Panamá. 3.-Plan-Nacional-de-Seguridad-Hídrica-2015-2050-Agua-para-Todos.pdf. : Índice de pobreza de agua (IPA) en 142 países. (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016)

Gráfico 2: Contraloría General de la República. Censos década 2020 (2021), evolución de los habitantes de la ciudad de Panamá. Censos década 2020 (2021). https://www.inec.gob.pa/archivos/P053342420231009161532Comentarios_Poblacion%20RFB%202023%20VF.pdf

Gráfico 3: Autoridad nacional de los servicios públicos (2016), Desglose de las tarifas de los prestadores del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario. <https://www.sinia.gob.pa/datos/Agua%20y%20saneamiento/Oferta%20y%20Usos%20de%20Agua%20en%20Panam%C3%A1%202019.pdf>

Gráfico 4: Autoridad nacional de los servicios públicos (2016), Desglose de las tarifas de los prestadores del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario. <https://www.sinia.gob.pa/datos/Agua%20y%20saneamiento/Oferta%20y%20Usos%20de%20Agua%20en%20Panam%C3%A1%202019.pdf>

Gráfico 5: Evolución anual del volumen de agua fugada en tuberías principales del abastecimiento.

Gráfico 6: Contador chorro único, AQUILA V5, DIHEL Metering, <https://www.diehl.com/metering/es/productos-y-soluciones/productos-servicios/medicion-de-agua/aquila-v5-fr/>

Gráfico 7: Patrón de consumo horario utilizado en el modelado de la red de ciudad de Panamá. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000100003

Gráfico 8: Evolución del caudal consumido en la red.

13.3. TABLAS

Tabla 1: Autoridad nacional de los servicios públicos (2016), Desglose de las tarifas de los prestadores del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario. <https://www.sinia.gob.pa/datos/Agua%20y%20saneamiento/Oferta%20y%20Usos%20de%20Agua%20en%20Panam%C3%A1%202019.pdf>

Tabla 2: Características según la clasificación de la banda de calidad de datos.

Tabla 3: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 1), <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 4: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (Chilibre 2), <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 5: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Pacora, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 6: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Miraflores, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 7: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Cabra 1, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 8: IDAAN HUB ARCGIS (2022), datos de la planta potabilizadora Cabra 2, <https://sig-idaan.hub.arcgis.com/apps/0a722564d72f421798b33b902ebef781/explore>

Tabla 9: Ing. Rafael Reyes y Joaquín A. De Gracia (2022), boletín estadístico no.36 2019-2022, Datos del abastecimiento de la ciudad de Panamá, Boletín estadístico (2019-2022). <https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 10: Ing. Rafael Reyes y Joaquín A. De Gracia (2022), boletín estadístico no.36 2019-2022. Datos del abastecimiento de la ciudad de Panamá. (Instituto de Acueductos y Alcantarillados). <https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 11: Ing. Rafael Reyes y Joaquín A. De Gracia (2022), boletín estadístico no.36 2019-2022. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 en millones de galones/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 12: Ing. Rafael Reyes y Joaquín A. De Gracia (2022), boletín estadístico no.36 2019-2022. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2022 en millones de m³/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>.

Tabla 13: Ing. Rafael Reyes y Sra. Magda Quirós (2021), boletín estadístico no.35 2018-2021. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2021 en millones de galones/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 14: Ing. Rafael Reyes y Sra. Magda Quirós (2021), boletín estadístico no.35 2018-2021. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2021 en millones de m³/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 15: Ing. Rafael Reyes y Sra. Magda Quirós (2020), boletín estadístico no.34 2017-2020. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2020 en millones de galones/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 16: Ing. Rafael Reyes y Sra. Magda Quirós (2020), boletín estadístico no.34 2017-2020. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2020 en millones de m³/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 17: Licda. Rosario Martín de Díaz y Sra. Magda Quirós (2019), boletín estadístico no.33 2016-2019. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2019 en millones de galones/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 18: Licda. Rosario Martín de Díaz y Sra. Magda Quirós (2019), boletín estadístico no.33 2016-2019. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2019 en millones de m³/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 19: Lic. Marien Peralta y Licda. Mercedes M. Martínez (2018), boletín estadístico no.32 2015-2018. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2018 en millones de galones/año.

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 20: Lic. Marien Peralta y Licda. Mercedes M. Martínez (2018), boletín estadístico no.32 2015-2018. Balance hídrico de la Ciudad de Panamá en el año 2018 en millones de m³/año. <https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

Tabla 21: Miguel Eduardo Medina (2019), Indicadores de gestión en sistemas de abastecimiento de agua potable. Evaluación según el valor del Índice relativo por longitud de red. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854008/html/>

Tabla 22: Miguel Eduardo Medina (2019), Indicadores de gestión en sistemas de abastecimiento de agua potable. Evaluación según el valor del Índice de fugas estructurales. <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854008/html/>

Tabla 23: Resultado de los cálculos de los indicadores de porcentaje.

Tabla 24: Comparación del índice de fugas estructurales entre distintos abastecimientos.

Tabla 25: Datos de volumen de agua fugada en tuberías principales. En Millones de m³/Año.

Tabla 26: Calculo del VAN para el contador volumetrico USFlow.

Tabla 27: Datos de los contadores domésticos.

Tabla 28: Calculo del VAN para el contador de chorro múltipleMT-KD.

Tabla 29: Cálculo del VAN para el contador de chorro único Atlantis.

Tabla 30: Datos de los contadores no domésticos.

Tabla 31: Calculo del VAN para el contador ultrasónico Traxco.

Tabla 32: Cálculo del VAN para el contador electromagnético Mca.Arkon.

Tabla 33: Estimación de la dotación de consumo de agua según el uso del suelo de la ciudad de Panamá.

Tabla 34: Asignación de las demandas a los nudos de consumo de la red.

Tabla 35: Estudio de las velocidades de las tuberías de la red de Calidonia.

Tabla 36: Resumen de la valoración de la calidad de datos en cada apartado.

13.4. ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1:

$$\% \text{ eficiencia global anual} = \frac{Q \text{ autorizado}}{Q \text{ inyectado}}$$

Donde:

Q autorizado = Caudal autorizado (Mgal)

Q inyectado = Caudal inyectado (Mgal)

Ecuación 2:

$$\% \text{ eficiencia red anual} = Nn = \frac{Q \text{ medido}}{Q \text{ inyectado}}$$

Donde:

Q medido = Caudal medido (Mgal)

Q inyectado = Caudal inyectado (Mgal)

Ecuación 3:

$$\% \text{ eficiencia medida anual} = \frac{Q \text{ medido}}{Q \text{ autorizado}}$$

Donde:

Q medido = Caudal medido (Mgal)

Q autorizado = Caudal autorizado (Mgal)

Ecuación 4:

$$\text{Longitud total de acometidas} = \text{Longitud por acometida} * \# \text{ de acometidas}$$

Donde:

Longitud de acometidas (km)

Longitud por acometida (km)

acometidas = Numero de acometidas (unidad)

Ecuación 5:

$$\text{Indicador relativo por longitud de red} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{L_{\text{red}}}$$

Donde:

Q perdido real = Caudal perdido real (lit/día)

L red = Longitud de red (km)

Ecuación 6:

$$\text{Indicador relativo por acometida} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{\# \text{ acometidas}}$$

Donde:

Q perdido real = Caudal perdido real (lit/día)

acometidas = Numero de acometidas (unidad)

Ecuación 7:

$$\text{Indicador relativo por presión y acometidas} = \frac{Q_{\text{perdido real}}}{\text{Presión media} * \# \text{ acometidas}}$$

Donde:

Q perdido real = Caudal perdido real (lit/día)

Presión media (m.c.a.)

acometidas = Numero de acometidas (unidad)

Ecuación 8:

UARL (Unavoidable Annual Real Losses)

$$UARL = \text{presión media } (a * Lm + B.nc + C.Lp)$$

Lm = Longitud de tuberías principales

Nc = Acometidas

Lp = longitud total de las acometidas

A, B y C = Variables empíricas

Ecuación 9:

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} = \frac{\text{Pérdidas actuales}}{\text{Pérdidas ideales}}$$

Ecuación 10:

Coste real del agua (C_{H_2O} mayorado)

$$C_{H_2O} \text{ mayorado} = C_{H_2O} * (1 + (-1 * \text{Rentabilidad economica del abastecimiento}))$$

Donde:

C_{H_2O} = Coste del agua para los abonados

Ecuación 11:

$$\text{Coste anual del agua} = V * CW$$

Donde:

CW = Coste del agua por volumen

V = Volumen

Ecuación 12:

Periodo óptimo entre inspecciones (OIP):

$$OIP = \sqrt{\frac{CI}{CW * NRRL * 0.5}}$$

NRRL = Índice de aumento de fugas de fondo

CW = Coste del agua por volumen

CI = Costes de inspección anual

Ecuación 13:

Porcentaje de red a inspeccionar al año (%RI)

$$\%RI = \frac{T}{OIP} * 100$$

Donde:

$T = \text{Tiempo}$

OIP = Periodo óptimo entre inspecciones

Ecuación 14:

Coste anual de inspecciones o annual cost inspection (ACI):

$$ACI = \%RI * CI$$

%RI = Porcentaje de red a inspeccionar al año

CI = Costes de inspección anual

Ecuación 15:

Longitud de red a inspeccionar al año (L insp)

$$L \text{ insp} = \%RI * L \text{ red}$$

Donde:

%RI = Porcentaje de red a inspeccionar al año

L red = Longitud total de la red

Ecuación 16:

Error o incertidumbre en la medición (% error cont):

$$\%_{error \text{ cont}} = \frac{V_{med}}{V_{sum}}$$

Donde:

V med = Volumen medido

V sum = Volumen suministrado

Ecuación 17:

Costes fijos

$$\text{Costes fijos} = -C \text{ comp} - C \text{ inst} - C \text{ adm}$$

Donde:

$C \text{ comp} = \text{Coste de compra}$

$C \text{ inst} = \text{Coste de instalación}$

$C \text{ adm} = \text{Coste administrativo}$

Ecuación 18:

Tasa de actualización deflactada (r'):

$$r' = \frac{(1 + r)}{(1 + s)} - 1$$

Donde:

$r = \text{Tasa de actualización nominal} = 5\% = 0.05$

$s = \text{Inflación anual} = 2.86\% = 0.0286$

Ecuación 19:

Ingresos por agua registrada

$$\text{Ingresos por agua registrada} = \forall_i * (1 - (\varepsilon_i + \varepsilon_d)) \frac{C_{H2O \text{ real}}}{(1 + r')^{(i-1)}}$$

Donde:

$i = \text{Tiempo de estudio (años)}$

$\forall_i = \text{Consumo anual promedio} \left(\frac{m^3}{\text{Abonado año}} \right)$

$\varepsilon_i = \text{Porcentaje de error del contador inicial (\%)}$

$\varepsilon_d = \text{Incremento del deterioro del contador (\%/año)}$

$C_{H2O \text{ real}} = \text{Coste del agua de venta al público} \left(\frac{\$}{m^3} \right)$

$r' = \text{Tasa de actualización deflactada (\%)}$

Ecuación 20:

Valor actual neto (VAN):

$$VAN = -\text{Costes fijos} + \text{Ingresos acumulados por agua registrada}$$

Ecuación 21:

$$D_t = \sum [(A_i * n_i * d_i) / 86400]$$

Donde:

Di: Demanda zonal para el uso i (l/día).

ni: niveles de la infraestructura (unidad).

Ai: Superficie edificable o superficie según el uso i determinado (m2).

Di: Dotación específica según su uso (l/m2/día).

Ecuación 22:

Coficiente emisor (C_e)

$$C_e = * \frac{Q_f}{(P)^a}$$

Q_f = Caudal de fuga. (l/s)

C_e = Coeficiente emisor. (m)

P = Presión en el nudo (m.c.a.)

a = Exponente de emisor.

Ecuación 23:

Porcentaje de fugas (% Fugas)

$$\% \text{ Fugas} = \frac{\text{Volumen de perdidas aparentes}}{\text{Volumen inyectado}}$$

Ecuación 24:

Caudal fugado (Q_f)

$$Q_f = (\text{caudal promedio demandado} * \% \text{ Fugas})$$

Donde:

% Fugas = Porcentaje de fugas

Ecuación 25:

Coefficiente emisor global de la red (C_e global):

$$C_e \text{ global} = * \frac{Q_f}{(\text{Presión media de los nudos})^n}$$

Donde:

Q_f = Caudal fugado (lit/s)

n = Exponente emisor

Presión media de los nudos (m.c.a.)

Ecuación 26:

Coefficiente emisor (C_e):

$$C_e = \frac{C_e \text{ global}}{\# \text{ nudos}}$$

Donde:

C_e global = Coeficiente emisor global de la red

nudos = número de nudos

Ecuación 27:

$$v \text{ max} = 1.5 * \frac{0.013}{n} * \sqrt{(ID + 0.05)}$$

Donde:

v max = Velocidad máxima de circulación del agua (m/s)

ID = Diámetro interior de la conducción (m)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

13.5. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

<https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/3964488/Norma+Redes+Abastecimiento+V4+2021.pdf>

<https://www.emivasa.es/Sites/1/Docs/Reglamento/Reglamento.pdf>

<https://www.idaan.gob.pa/wp-content/uploads/2016/04/Normativas.pdf>

<https://www.idaan.gob.pa/wp-content/uploads/2016/05/MEMORIAS-2013.pdf>

<https://www.laestrella.com.pa/economia/191022/191024-48-agua-genera-pierde-potabilizada>

<https://blogdelagua.com/tematica/abastecimiento/panama-es-el-pais-latino-que-mas-agua-consume/>

<http://elsiglo.com.pa/panama/500-fugas-reportan/24162004>

https://www.idaan.gob.pa/wp-content/uploads/2016/04/Boletin_estadistico_2021.pdf

<https://www.idaan.gob.pa/idaan-realizara-cortes-a-clientes-morosos-durante-el-mes-de-noviembre/>

<https://www.france24.com/es/video/20230303-panam%C3%A1-litros-de-agua-sucia-corren-por-quebradas-que-desembocan-en-el-oc%C3%A9ano-pac%C3%ADfico>

<https://www.idaan.gob.pa/deteccion-de-fallas-a-traves-de-camaras-tecnologia-moderna-para-detectar-fugas/>

<https://www.panamaamerica.com.pa/sociedad/consumo-de-agua-se-incrementa-en-temporada-seca-1216140>

<https://medium.com/@RyuAustro/la-triste-historia-del-idaan-cd7d319c7652>

<https://www.panamaamerica.com.pa/sociedad/consumo-de-agua-se-incrementa-en-temporada-seca-1216140>

<https://www.senacyt.gob.pa/investigacion-cientifica-analizara-la-demanda-de-agua-potable-para-la-optimizacion-de-los-sistemas-de-acueductos-en-panama/#:~:text=Nuestro%20pa%C3%ADs%20cuenta%20con%20un,189%20L%2Fpersona%2Fd%C3%ADa.>

<https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>

https://www.idaan.gob.pa/wp-content/uploads/2016/04/Boletin_estadistico_2021.pdf

<https://www.idaan.gob.pa/wp-content/uploads/2016/05/MEMORIAS-2020.pdf>

<https://www.sinia.gob.pa/datos/Agua%20y%20saneamiento/Oferta%20y%20Usos%20de%20Agua%20en%20Panam%C3%A1%202019.pdf>

<https://elcapitalfinanciero.com/agua-en-panama-cerrando-circulos-viciosos-con-tecnologia/>

<https://www.idaan.gob.pa/participacion-del-ing-guillermo-torres-diaz-en-panel-sobre-agua-y-seguridad->

<hidrica/#:~:text=Se%20ha%20planteado%20por%20conocedores,por%20fugas%20en%20el%20sistema.>

<https://blogdelagua.com/tematica/abastecimiento/panama-es-el-pais-latino-que-mas-agua-consume/>

<https://monitoringevaluationaccountabilityandlearning.com/ngomeal-com/meal/articles/why-are-indicators-necessary/>

<https://unece.org/DAM/env/europe/monitoring/Indicators/C-7-en-final.pdf>

https://www.miya-water.com/fotos/artigos/15_water_loss_performance_indicators_6560934665a32619c8808b.pdf

https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/19/e3sconf_ekodok2018_00131.pdf

<https://iwaponline.com/aqua/article-abstract/48/6/227/30173/A-review-of-performance-indicators-for-real-losses?redirectedFrom=fulltext>

<https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Digital-Learning-Resources/03-Water-Loss.pdf>

<https://www.leakssuitelibrary.com/ili-overviews-by-country/>

<https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854008/html/>

<https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2630>

<https://predictiva21.com/optimizacion-costo-riesgo-frecuencia-mantenimiento/>

<https://www.asegur.com/totmagazine/4-pasos-para-cambiar-las-tuberias-es-posible-hacerlo-sin-obras/>

<https://www.traxco.es/blog/productos-nuevos/reparar-tuberias-y-depositos>

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/algunos-metodos-de-reparacion-de-tuberias-plasticas>

<https://www.hogar.mapfre.es/bricolaje/fontaneria/arreglar-tuberia/>

https://www.fontanerialucero.es/como-reparar-una-fuga-de-agua-en-tuberia-de-pvc/?expand_article=1

<https://es.serruriershouilles.fr/reparacion-de-tuberias-de-metal-plastico-causas-y-metodos-para-eliminar-fugas-295>

<https://tufda.online/como-reparar-una-fuga-de-agua-en-tuberia-de-hierro-galvanizado/>

<https://www.henkel-adhesives.com/es/es/productos/material-de-reparaci%C3%B3n/material-de-reparaci%C3%B3n-de-tuber%C3%ADas.html>

<https://saneamientosmungia.com/reparacion-de-tuberias-sin-zanja/>

<https://www.aristegui.info/conoces-las-tecnologias-sin-zanja-no-dig-con-tuberias-plasticas/>

14. ANEXOS

Anexo 1: Dotación asignada a cada nudo de consumo.

| ID | CAUDAL TOTAL (l/s) | USO DE SUELO | ÁREA (m ²) | Nº DE NIVELES | DOTACIÓN (l/(m ² *DIA)) | CAUDAL (l/s) | USO DE SUELO | ÁREA (m ²) | Nº DE NIVELES | DOTACIÓN (l/(m ² *DIA)) | CAUDAL (l/s) | USO DE SUELO | ÁREA (m ²) | Nº DE NIVELES | DOTACIÓN (l/(m ² *DIA)) | CAUDAL (l/s) | USO DE SUELO | ÁREA (m ²) | Nº DE NIVELES | DOTACIÓN (l/(m ² *DIA)) | CAUDAL (l/s) | | | | |
|-----|--------------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|--|--|--|--|
| N1 | 16,90 | 2 | 7981,5 | 6 | 30,50 | 16,90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N2 | 15,83 | 3 | 4981,8 | 9 | 30,50 | 15,83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N4 | 0,52 | 4 | 30055,9 | 1 | 1,50 | 0,52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N5 | 0,53 | 3 | 754,6 | 2 | 30,50 | 0,53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N6 | 0,81 | 1 | 1928,6 | 1 | 36,21 | 0,81 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N7 | 8,43 | 3 | 4778,6 | 5 | 30,50 | 8,43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N8 | 3,44 | 2 | 1482,5 | 2 | 30,50 | 1,05 | 2 | 624,9 | 8 | 30,50 | 1,76 | 2 | 892,3 | 2 | 30,50 | 0,63 | | | | | | | | | |
| N9 | 48,86 | 2 | 4071,5 | 34 | 30,50 | 48,86 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N10 | 34,08 | 3 | 6896,8 | 14 | 30,50 | 34,08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N11 | 76,28 | 2 | 5541,6 | 39 | 30,50 | 76,28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N12 | 62,27 | 2 | 5691,1 | 31 | 30,50 | 62,27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N13 | 16,89 | 2 | 1708,8 | 28 | 30,50 | 16,89 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N15 | 20,69 | 3 | 1974,2 | 11 | 30,50 | 7,67 | 2 | 1230,4 | 30 | 30,50 | 13,03 | | | | | | | | | | | | | | |
| N16 | 2,19 | 1 | 5231,0 | 1 | 36,21 | 2,19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N17 | 5,59 | 2 | 3631,0 | 2 | 30,50 | 2,56 | 3 | 1427,2 | 6 | 30,50 | 3,02 | | | | | | | | | | | | | | |
| N20 | 4,95 | 2 | 2403,8 | 2 | 30,50 | 1,70 | 3 | 716,5 | 2 | 30,50 | 0,51 | 2 | 3894,7 | 2 | 30,4962406 | 2,75 | | | | | | | | | |
| N23 | 5,49 | 3 | 5187,6 | 3 | 30,50 | 5,49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N24 | 8,27 | 3 | 872,4 | 8 | 30,50 | 2,46 | 2 | 4110,5 | 4 | 30,50 | 5,80 | | | | | | | | | | | | | | |
| N25 | 0,01 | 4 | 811,7 | 1 | 1,50 | 0,01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N27 | 2,83 | 3 | 4011,8 | 2 | 30,50 | 2,83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N28 | 3,33 | 3 | 4713,3 | 2 | 30,50 | 3,33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N29 | 3,59 | 3 | 474,0 | 4 | 30,50 | 0,67 | 2 | 4139,7 | 2 | 30,50 | 2,92 | | | | | | | | | | | | | | |
| N30 | 4,00 | 2 | 5664,8 | 2 | 30,50 | 4,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N31 | 6,85 | 2 | 3524,7 | 2 | 30,50 | 2,49 | 2 | 1126,5 | 5 | 30,50 | 1,99 | 2 | 961,3 | 7 | 30,4962406 | 2,38 | | | | | | | | | |
| N32 | 11,40 | 3 | 1090,8 | 4 | 30,50 | 1,54 | 3 | 5560,7 | 1 | 30,50 | 1,96 | 3 | 4512,3 | 4 | 30,4962406 | 6,37 | 3 | 539,7 | 8 | 30,50 | 1,52 | | | | |
| N33 | 4,45 | 3 | 1543,9 | 7 | 30,50 | 3,81 | 3 | 1797,1 | 1 | 30,50 | 0,63 | | | | | | | | | | | | | | |
| N34 | 3,65 | 3 | 1477,4 | 7 | 30,50 | 3,65 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N35 | 3,97 | 3 | 3752,8 | 3 | 30,50 | 3,97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N37 | 0,97 | 3 | 731,1 | 2 | 20,50 | 0,52 | 3 | 512,9 | 2 | 30,50 | 0,36 | 4 | 5259,1 | 1 | 1,5 | 0,09 | | | | | | | | | |
| N38 | 6,96 | 3 | 4927,2 | 4 | 30,50 | 6,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N40 | 30,16 | 2 | 4599,5 | 2 | 30,50 | 3,25 | 2 | 361,8 | 15 | 30,50 | 1,92 | 3 | 1331,1 | 8 | 30,4962406 | 3,76 | 3 | 15044,2 | 4 | 30,50 | 21,24 | | | | |

