



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Herramientas para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación del Balance Hídrico en el Sistema de Acueducto de la ciudad de Bogotá**

Diana Constanza Galindo Salazar

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería civil  
Bogotá, Colombia

2014

# **Herramientas para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación del Balance Hídrico en el Sistema de Acueducto de la ciudad de Bogotá**

Diana Constanza Galindo Salazar

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ingeniería en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Director (a):

Ph.D., Msc., IC. Nelson Obregón Neira

Línea de Investigación:

Gestión del agua

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil  
Bogotá, Colombia

2014

## Dedicatoria

La presente tesis la dedico a mi familia quien me ha apoyado siempre de forma incondicional mi crecimiento como persona y como profesional y ha sido determinante en cada uno de mis logros, especialmente mi mamá. A Miguel Ángel Hernández que ahora hace parte de mi familia y que gracias a su amor y apoyo incondicional ha permitido culminar este trabajo.



## **Agradecimientos**

Agradezco al ingeniero Nelson Obregón por sus consejos, su paciencia y su guía valiosa en el desarrollo de la investigación.

Agradezco al ingeniero Mauricio Jiménez por su valioso apoyo en el desarrollo de este trabajo y por su siempre gentil colaboración.

Agradezco a la Universidad Nacional y a su grupo de profesores por brindarme todas las herramientas académicas y sociales necesarias para desarrollar un trabajo de este tipo.

Agradezco a todos mis amigos, compañeros de trabajo y conocidos por el apoyo emocional brindado durante todo el desarrollo de la tesis.



## Resumen

Este documento presenta el desarrollo de una metodología para el cálculo de la incertidumbre individual y acumulada de cada uno de los componentes del balance hídrico sugerido por la IWA y para varios indicadores de eficiencia comúnmente utilizados. El principal objetivo de la investigación buscar ofrecer a las empresas de servicio público herramientas que les permita medir la confiabilidad de sus sistemas de medición y evaluación tanto de pérdidas físicas como comerciales, de forma que en base a los resultados de los cálculos derivados de estos pueda tomar mejores decisiones y por tanto enfocar mejor sus programas de optimización de redes y reducción de pérdidas físicas de agua. La evaluación de la incertidumbre se realiza con base en el desarrollo de series de Taylor para el cálculo de incertidumbre de primer orden.

**Palabras clave:** Incertidumbre. Redes de Acueducto. Pérdidas físicas de agua. Non-Revenue Water NRW. Agua no contabilizada. Balance de agua. Gestión de pérdidas. Sistemas de medición.

### Abstract

This paper presents the development of a methodology for the calculation of individual uncertainty and accumulated for each of the components of the water balance suggested by the IWA and several commonly used indicators of efficiency. The main objective of the research seek to provide utilities tools that allow them to measure the reliability of their measurement systems and evaluation of both physical losses as commercial, so that based on the results of the calculations derived from these can make better decisions and therefore better focus their programs network optimization and reduction of physical water losses. The uncertainty assessment is made based on the Taylor series development for calculating first-order uncertainty.

**Keywords:** Uncertainty. Aqueduct networks. Water losses. Non-Revenue Water NRW. Water balance. Management of losses. Measurement Sytem.

# Contenido

## Contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>13</b>
1.1 Generalidades.....	14
1.2 Antecedentes .....	17
1.3 Definición del problema.....	18
1.4 Justificación de la investigación.....	19
1.5 Objetivos .....	20
1.5.1 Objetivo General.....	20
1.5.2 Objetivos específicos .....	20
1.6 Metodología .....	21
1.7 Contenido del documento.....	25
<b>2. Estado del Arte .....</b>	<b>27</b>
2.1 Balance hídrico .....	27
2.2 Pérdidas de agua $Q_p, (U)=(A)-(P)$ .....	37
2.2.1 Pérdidas Comerciales $Q_{pa}$ .....	38
2.2.2 Pérdidas Técnicas $Q_{pr}$ .....	41
2.3 Confiabilidad de los cálculos de balance hídrico .....	43
2.3.1 Límites de confianza de 95 %.....	43
2.4 Estudio de Propagación de la incertidumbre .....	45
2.4.1 Conceptos básicos .....	47
2.4.2 Clasificación de los errores.....	48
2.4.3 Cifras significativas .....	52
2.4.4 Histogramas y distribución estadística .....	53
2.4.5 Propagación de incertidumbres .....	57
2.5 Equipos de medición .....	60



2.5.1	Características.....	60
2.5.2	Tipos de Medidor .....	64
2.6	Indicadores.....	71
2.7	Normatividad .....	79
2.8	Otros sistemas – brechas.....	84
2.8.1	Pérdidas de Agua (Datos internacionales) .....	85
2.8.2	Pérdidas de Agua en Latinoamérica .....	87
2.8.3	Pérdidas de Agua en Colombia .....	91
<b>3.</b>	<b>Sistema de Acueducto de Bogotá.....</b>	<b>95</b>
3.1	Descripción del sistema.....	95
3.1.1	Tres sistemas de abastecimiento.....	96
3.1.2	Seis plantas .....	100
3.1.3	Red de distribución mayor – Red Matriz .....	107
3.1.4	Sectorización Hidráulica .....	113
3.1.5	Macromedición .....	118
3.2	Flujo del agua.....	119
3.3	Flujo de la información .....	121
3.3.1	Indicadores de gestión.....	124
<b>4.</b>	<b>Modelo Conceptual - Análisis de Incertidumbre .....</b>	<b>127</b>
4.1	Ecuaciones de cálculo o estimación de cada componente. Análisis por componentes .....	127
4.1.1	Volumen de entrada al Sistema <b>Vi1</b> .....	132
4.1.2	Volumen de agua exportada <b>Vexp1</b> .....	137
4.1.3	Consumos .....	139
4.2	Indicadores.....	160
4.3	Desarrollo de ecuaciones de incertidumbre para cada componente.....	162
4.4	Desarrollo de ecuaciones de incertidumbre para principales indicadores.....	170
4.5	Definición de criterios para asignación de bandas de confianza y asignación de las mismas.....	172
<b>5.</b>	<b>Modelación del Sistema.....</b>	<b>174</b>
5.1	Reproducción cálculo del balance hídrico para una unidad hidráulica de Bogotá (Sector hidráulico).....	174

---

5.1.1 Selección del sector.....	174
5.1.2 Datos de entrada y datos estimados (Preprocesamiento de la información)	175
5.1.3 Procesamiento información macromedición.....	179
5.1.4 Desarrollo aplicativo - Desarrollo de software aplicación amigable con el usuario .....	181
5.1.5 Aplicativo .....	182
5.1.6 Modelación de escenarios. Análisis de sensibilidad.....	184
5.1.7 Presentación de resultados .....	184
5.1.8 Análisis de resultados y comprobación de hipótesis .....	190
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>195</b>
6.1 Conclusiones.....	195
6.2 Recomendaciones.....	197
<b>Bibliografía .....</b>	<b>199</b>

## Lista de figuras

Ilustración 2-1 - Intervalo asociado al resultado de una medición .....	45
Ilustración 2-2 - Exactitud y Precisión .....	47
Ilustración 2-3 – Distribución Gaussiana o Normal .....	54
Ilustración 2-4 – Vista longitudinal tubería Medidores Ultrasónicos .....	68
Ilustración 2-5 –Esquema principio operativo medidores ultrasónicos .....	69
Ilustración 2-6 – Esquema principio operativo medidores electromagnéticos.....	69
Ilustración 2-7 –IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en el mundo .....	85
Ilustración 2-8 – IPUF en Lationamerica – 25 mejores empresas Año 2008 [18] .....	88
Ilustración 2-9 – IPUF en Lationamerica – 25 empresas de mayor tamaño Año 2008 [18] .....	89
Ilustración 2-10 – IPUF en Lationamerica – 25 empresas de menor tamaño Año 2008 [18].....	89
Ilustración 2-11 – IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en Latinoamerica .....	90
Ilustración 2-12 – IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en Colombia.....	91
Ilustración 2-13 – IANC principales ciudades Colombia 2007-2008.....	92
Ilustración 2-14 – Evolución índice de agua no contabilizada (IANC) por tipo de empresa.....	93
Ilustración 3-1 –Sistemas de captación del sistema de acueducto de Bogotá.....	100
Ilustración 3-2 – Zonas de servicio EAAB E.S.P .....	112
Ilustración 3-3 – Sectorización hidráulica Bogotá .....	114
Ilustración 3-4 – Zonas Bogotá - Sectorización .....	117
Ilustración 3-5 – Flujo del agua .....	120
Ilustración 3-6 – Procesamiento de datos macromedidos .....	123
Ilustración 3-7 – Determinación de volúmenes de suministro .....	123
Ilustración 3-8 – Determinación de volúmenes de suministro .....	125
Ilustración 3-9 – Flujo de información Balance Hídrico EAAB E.S.P.....	126
Ilustración 4-1 – Desagregación del Balance Hídrico .....	128
Ilustración 4-2 – Definición de componentes Balance Hídrico .....	128
Ilustración 4-3 – Esquema determinación pérdidas reales .....	132
Ilustración 4-4 - Puntos de medición de volumen producido total bruto por la EAAB E.S.P Zona 10 .....	134
Ilustración 4-5 – Cálculo del volumen de entrada –área bajo la curva .....	136
Ilustración 4-6 –Ciclos de Facturación volúmenes micromedidos .....	140
Ilustración 4-7 –Ciclos de Facturación para lecturas realizadas el mismo mes en consideración	141
Ilustración 4-8 –Ciclos de Facturación para volúmenes con lecturas anteriores y posteriores al mes en consideración .....	141
Ilustración 4-9 – Contenido modelo Conceptual .....	162

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1 – Balance Hídrico IWA .....	28
Tabla 2.2 – Desagregación detallada Balance Hídrico IWA.....	29
Tabla 2.3 – Componentes Balance Hídrico IWA.....	30
Tabla 2.4 – Comparación entre medidores ultrasónicos y electromagnéticos .....	70
Tabla 2.5 – Indicadores de desempeño en sistemas de acueducto.....	75
Tabla 2.6 – Ventajas y desventajas Índice de fugas en infraestructura ILI .....	77
Tabla 2.7 – Evaluación del sistema de acuerdo a ILI.....	78
Tabla 2.8 - Estimativos IANC para países desarrollados y en desarrollo.....	85
Tabla 2.9 - IANC para diferentes ciudades Latinoamericanas .....	86
Tabla 2.10 - Estimativos IANC para países desarrollados y en desarrollo.....	86
Tabla 2.11 – Perdidas físicas de agua en Bogotá con respecto al estándar internacional .....	87
Tabla 2.12 – Perdidas físicas de Suramericana.....	87
Tabla 2.13 – IPUF 2008 .....	90
Tabla 2.14 – IANC en Colombia 1999-2000.....	92
Tabla 2.15 – IANC en Colombia por Empresas de servicios de agua.....	92
Tabla 3.1 – Capacidad Agregado Norte .....	97
Tabla 3.2 – Capacidad Agregado Sur .....	99
Tabla 4.1 – Puntos de medición de volumen producido total bruto por la EAAB E.S.P Zona 10 .....	134
Tabla 4.2 – Esquema caudales horarios macromedidos .....	135
Tabla 4.3 – Variables y constantes Volumen de agua de entrada <b>Vi1</b> .....	137
Tabla 4.4 – Variables y constantes Volumen de agua exportada <b>Vexp1</b> .....	138
Tabla 4.5 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado <b>Cdf1</b> .....	142
Tabla 4.6 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado <b>Cdf1</b> .....	143
Tabla 4.7 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado no medido <b>Cdf2</b> .....	145
Tabla 4.8 – Variables y constantes Consumo no doméstico facturado no medido Cdnf_2.....	147
Tabla 4.9 – Variables y constantes Consumo doméstico no facturado medido Cdnf_1.....	147
Tabla 4.10 – Variables y constantes Consumo no doméstico no facturado medido Cdnf_1.....	148
Tabla 4.11 – Variables y constantes Usuarios autorizados no facturados medidos Canf_1 .....	148
Tabla 4.12 – Variables y constantes Consumo doméstico no facturado no medido Cdnf_2.....	149
Tabla 4.13 – Variables y constantes Consumo no doméstico no facturado no medido Cdnf_2.....	150
Tabla 4.14 – Variables y constantes Usuarios autorizados no facturados no medidos Canf_2 .....	151
Tabla 4.15 – Variables y constantes Agua utilizada por la empresa en daños .....	152
Tabla 4.16 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa tomada de hidrantes .....	153
Tabla 4.17 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa tomada por carrotanques.....	154
Tabla 4.18 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa para desagüe de tanques .....	154
Tabla 4.19 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa en lavado de tuberías .....	155
Tabla 4.21 – Variables y constantes Consumo a través de conexiones ilegales Cil_2 – Clandestinos masivos .....	156
Tabla 4.22 – Variables y constantes Variables y constantes Consumo a través de conexiones ilegales Cil_2 – Clandestinos dispersos .....	158

# Introducción

Este primer capítulo tiene como objetivo presentar al lector la importancia de la investigación en el contexto actual y las mejoras en los procesos relacionados con la gestión del agua. Inicia con unas generalidades concernientes a la investigación, los antecedentes de la misma, la definición del problema actual y la justificación del porque centrar nuestra mirada en este estudio. Cerrando con la definición de los objetivos generales y específicos de la investigación y la definición de la metodología que se consideró más apropiada para alcanzar cada uno de estos.

La gestión sostenible e integral de los recursos hídricos es uno de los problemas mundiales más exigentes. El agua dulce es un recurso limitado y los rápidos cambios mundiales tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, la migración y la urbanización están ejerciendo nuevas presiones sobre los recursos hídricos y la infraestructura que abastece de agua potable a los ciudadanos, empresas, industrias e instituciones.

Los mayores problemas de agua en el mundo están relacionados con la administración de este recurso. Parte de las mayores preocupaciones de los directores de empresas de agua y alcantarillado durante la última década ha sido la expansión de la cobertura de servicios. En la actualidad gran parte de las ciudades de América Latina cuentan con índices razonables de cobertura de servicios de agua debido a las cuantiosas inversiones en programas para la construcción de nuevas obras. Sin embargo, la operación, mantenimiento y administración del sistema han carecido de un enfoque de optimización que evite que los costos de una precaria administración recaigan en los usuarios, principalmente en aquellos usuarios en condiciones socioeconómicas poco favorables.

Factores agravantes en los países en desarrollo es la enorme cantidad de agua que se pierde por fugas en las redes de distribución de agua, denominadas pérdidas físicas

reales de agua, y los volúmenes de agua que se distribuyen sin haber sido facturados, conocidas como pérdidas aparentes de agua medidas actualmente por indicadores porcentuales de relación entre el agua facturada y el agua producida, tales como el Índice de Agua No Contabilizada (IANC) en Colombia o Non-Revenue Water (NRW) expresado como la diferencia entre la cantidad de agua puesta en el sistema de distribución y la cantidad de agua facturada a los consumidores en otros países.

Los altos niveles de pérdidas de agua en los sistemas de distribución son el principal desafío al que las entidades prestadoras de servicios públicos, de países en desarrollo, se enfrentan actualmente. En 2006, el Banco Mundial estimó que un promedio del 40 al 50% del agua producida en los países en desarrollo es agua no facturada [1]. Para los países en desarrollo se estima que tienen un volumen NRW anual de 27 mil millones de m<sup>3</sup>, de acuerdo con los cálculos elaborados por el Banco Mundial sobre la base de que un promedio de 35% del agua que entra al sistema se pierde. Esto representa aproximadamente US \$ 6 mil millones en ingresos que los servicios públicos de agua pierden cada año. Reducir a la mitad la cantidad de agua perdida daría suficiente agua para abastecer a 90 millones de personas, casi dos veces la población de nuestro país. Esto significa que cantidades significativas de agua y los ingresos se están perdiendo, obligando a las empresas de acueducto a enfocarse en controlar eficazmente las pérdidas de agua, en pro de aumentar sus ingresos, cuidar el recurso y optimizar su uso.

Las fugas representan una pérdida efectiva de agua, con reflejos sociales y económicos importantes en la población, ya que se trata de agua captada, bombeada, tratada, almacenada, distribuida y en el instante en que está lista para ser consumida se pierde debido a fallas en el sistema de acueducto. Además de que altas fugas de agua pueden ser las responsables de más del 25% del consumo de energía en una empresa dedicada al suministro de agua. La compensación de estas fugas genera mayor extracción de agua, hecho que se traduce en mayor presión sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

## **1.1 Generalidades**

Existen múltiples razones para reducir las pérdidas de agua, entre ellas se encuentran:

- Reducción de costos ya que se reducen pérdidas técnicas, agua que se produce y nadie se toma.
- Reducción en los costos de producción y por tanto aplazamiento de obras de expansión.
- Generación de un mayor margen para las inversiones.
- Reducción en la tarifa para los usuarios.
- Incrementos en los ingresos al reducir los volúmenes de pérdidas comerciales: agua que alguien se toma y no paga por ella.
- Mayor responsabilidad social empresarial puesto que es injusto que todas las pérdidas de agua las paguen los usuarios que si pagan las tarifas, protegiendo a los usuarios regulares frente a los usuarios fraudulentos.
- Mitigación de impactos ambientales al lograr el aplazamiento de proyectos de expansión de capacidad de abastecimiento
- Liberación del recurso hídrico para otros usos.

Como se mencionó en la sección anterior, la eficiencia con que las empresas de servicios públicos desarrollan su labor es ampliamente comparada por medio de indicadores como el NRW o el IANC. El índice de Agua No Contabilizada, es un indicador que además de medir las pérdidas relativas de agua potable, es ampliamente utilizado para diagnosticar la eficiencia general de una entidad prestadora de un servicio de acueducto. Así como un índice superior al 40% no es común encontrarlo en una Empresa eficiente, en términos de otros indicadores de desempeño, tampoco será razonable encontrar un valor de este indicador por debajo del 25%, en una entidad calificada como ineficiente según otros indicadores.

La eficiencia en la inversión es una condición que las Empresas de servicios públicos están obligadas a demostrar hoy más que nunca. La falta de conocimiento del comportamiento del sistema puede orientar equivocadamente una política de inversión, impulsando proyectos que expandan las obras existentes de aducción, plantas de tratamiento y estaciones de bombeo, cuando en realidad la solución apropiada podría ser detener el caudal perdido a través de las fugas. La explotación óptima de la infraestructura instalada significa maximizar su utilización, lo cual es posible lograr con una distribución en la que se protejan las tuberías y se minimicen los desperdicios. El

primer paso hacia todos los objetivos antes mencionados es el de orientar la gestión a evaluar con seguridad el nivel de rendimiento de la red de agua.

Actualmente el éxito competitivo de las empresas de servicios públicos está vinculado a su habilidad para explotar sus activos intangibles. Esta situación hace que las empresas deban tener clara la forma de cómo analizar y evaluar los procesos de su negocio [2], es decir debe tener claro cómo funciona su sistema y cuál es su desempeño. La medición del desempeño puede ser definida generalmente, como una serie de acciones orientadas a medir, evaluar, ajustar y regular las actividades de una empresa.

Existen diversas medidas de control en sistemas de acueducto, dentro de ellos encontramos estrategias como la sectorización y consecuentes de esta, los programas de control de pérdidas. La sectorización de la red de acueducto es una estrategia para la formulación, manejo y control de un programa de control de pérdidas. La sectorización de la red además de ser una herramienta de control de la infraestructura, que optimiza la operación del sistema, es una estrategia de formulación, seguimiento y control de pérdidas al nivel de unidades hidráulicas menores como por ejemplo los sectores hidráulicos en la ciudad de Bogotá.

Un Plan de Control de Pérdidas se construye dando respuesta a las siguientes cinco preguntas claves: ¿Cuánta agua se pierde? ¿Dónde se pierde? ¿Por qué se pierde? ¿Qué se puede hacer para reducir la pérdida? ¿Qué se debe hacer para mantener el nivel de pérdidas en un valor reducido? [3] La forma de determinar cuánta agua se pierde consiste en un análisis de la situación inicial del sistema, de forma que se pueda evaluar y visualizar el agua no contabilizada de acuerdo con el balance hídrico. Para conocer donde se pierde se calculan las pérdidas de agua a nivel de unidades hidráulicas más pequeñas, sectores y subsectores. La justificación para estas pérdidas se determina por medio de la descomposición de las causas de esta pérdidas, físicas o comerciales. Las pérdidas pueden ser reducidas a partir de la formulación de programas de control de pérdidas, que pueden mantenerse en niveles aceptables por medio de actividades permanentes y planes de monitoreo.

La cuantificación de las pérdidas de acuerdo con sus causas es una tarea compleja. Se requiere conocer la disponibilidad y exactitud de la información necesaria y los errores de



precisión inherentes a los modelos de cálculo para cuantificar las pérdidas en cada componente y en cada sector. Actualmente el cálculo del balance hídrico, en la mayoría de empresas que realizan auditorias del agua completas, se hace con base en la metodología de desagregación de pérdidas del IWA.

## 1.2 Antecedentes

A partir de las últimas décadas del siglo XX, las empresas han experimentado la necesidad de controlar mejor sus procesos, dentro de ellos el de medición. La importante gestión de la medición está fuertemente ligada tanto a la economía de la empresa como a la del usuario final o cliente, evidenciado con las tarifas del cobro de servicio. Si bien todo administrador de un sistema de acueducto puede argüir que tiene control de su infraestructura, el punto que interesa medir es el grado de control que efectivamente alcanza.

"La medición es el primer paso que conduce al control y, finalmente, a la mejora. Si no se puede medir algo, no se puede entender. Si no se puede entender, no se puede controlar. Si no se puede controlar, no se puede mejorar"<sup>1</sup>. H. James Harrington

El objetivo de los sistemas de medición es aportar a la empresa el camino correcto para que ésta logre enfocar acciones en pro de cumplir con las metas que se proponga, ya que de este depende el cálculo del Balance Hídrico, es decir, el conocimiento de cuando producimos, cuánto se pierde de esa agua producida y donde se pierde.

Bajo la perspectiva de que la medición del agua es una herramienta de gestión indispensable para el control de pérdidas, se requiere controlar al máximo todas las actividades que influyen en cada nivel de medición de tal forma que se entienda como se comporta verdaderamente el sistema. Cuando se elabora el cálculo del balance hídrico, la exactitud de los volúmenes de pérdida de agua depende de la exactitud y calidad de datos utilizados en el cálculo, por tanto, una medición confiable de todos los volúmenes de agua que ingresan y salen del sistema de abastecimiento es un requisito fundamental.

---

<sup>1</sup> "Measurement is the first step that leads to control and eventually to improvement. If you can't measure something, you can't understand it. If you can't understand it, you can't control it. If you can't control it, you can't improve it"

### 1.3 Definición del problema

La precisión y semejanza con la realidad de lo que se mide ha pasado a ser uno de los temas de mayor interés en las empresas que prestan el servicio de acueducto, más aún cuando se aborda desde un enfoque financiero, en donde la venta de agua y los ingresos monetarios derivados de esta están directamente relacionada con la medición del volumen que se produce y el que se entrega. Por esta razón, hoy en día controlar con altos niveles de precisión cada  $\text{cm}^3$  de agua es un foco de atención e investigación en instituciones relacionadas con la gestión del agua.

En un sistema tan complejo como el de un acueducto de una ciudad, son numerosas las variables que se pueden medir y aún más las fuentes de error asociadas con tal medición. Un modelo de producción de agua requiere de medidas tan precisas y exactas como sea posible. La confiabilidad y exactitud de la información debe ser evaluada de manera crítica.

Gracias a los sistemas de medición que actualmente se implementan con el uso de macromedidores se puede contar con cantidades de datos medidos a diario, con altas resoluciones de tiempo y espacio, que favorecen la gestión del servicio y el control del sistema. Una de las mediciones más importantes y exigentes es el caudal o volumen como cuantificación tangible del recurso. Tradicionalmente las mediciones de caudal se realizan a través de medidores de agua. Estos instrumentos de precisión utilizan diferentes principios mecánicos o físicos para la cuantificación del flujo de agua que pasa por la sección donde se encuentra instalado el instrumento. Estas mediciones presentan individualmente incertidumbre y a su vez asocian conjuntamente incertidumbre resultado del procesamiento de datos para realizar el cálculo del balance hídrico.

La incertidumbre de los valores de volúmenes de entrada al sistema, el consumo no facturado autorizado, el cual muchas veces no es rigurosamente medido; la determinación de los porcentajes de pérdidas reales y comerciales el cual se basa en el número de fugas y conexiones ilegales encontradas; suponiendo que realmente se han encontrado todas ellas, y gran parte del balance hídrico se basa en una serie de estimaciones. Por lo tanto, aunque impresionante sobre el papel se corre el riesgo de que el balance hídrico sea sólo un tigre de papel, con algunos toques de realidad. [4]

De igual forma se sabe que errores de medición y su correspondiente propagación en sistemas en línea son la principal causa de pérdidas aparentes en un sistema de distribución de agua [5]. Existen posibles razones que influyen en tales errores, entre ellos, la disminución de la eficiencia de los contadores de agua. Esto debido al desgaste, su incorrecta instalación, falta de calibración, o que no son lo suficientemente precisos, etc. Estos errores de medición se relacionan con la evaluación de las cantidades de agua y no con pérdida de agua propiamente dicha.

En la actualidad no se analiza la calidad e incertidumbre de la información recopilada y procesada. Se miden procesos individuales sin un análisis riguroso de la información recopilada, no se estudian los resultados del procesamiento de datos considerando la conectividad de los procesos y mucho menos se estudia la incertidumbre asociada a la estimación de datos y su correspondiente propagación. Toda esta ausencia de análisis de la información no permite contar con un estudio detallado que contribuya a conocer que tan confiable y aproximada a la realidad es la información sobre la cual se basa la toma de decisiones en las empresas que gestionan el agua que todos los días consumimos.

## **1.4 Justificación de la investigación**

En la actualidad, los métodos para estimar la incertidumbre de las mediciones en el área de recursos hídricos son bastante comunes, sobre todo en hidrología. En la última década, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles de Medio Ambiente y el Instituto de Recursos Hidráulicos de los Estados Unidos ha formado comités para hacer frente a la necesidad de ampliar métodos para la determinación de la incertidumbre en la medición y su propagación [6]

A pesar de que estos comités han revisado las metodologías existentes para el análisis de la incertidumbre y han identificado las mejores prácticas para la cuantificación de la medida de errores y su correspondiente propagación, hay un vacío en la literatura acerca de las técnicas para la identificación y análisis de fuentes y formas de propagación del error en sistemas particulares como el de acueductos en línea y mucho más en el planteamiento de metodologías claras que permitan identificar, analizar y por tanto reducir tales incertidumbres.

La incertidumbre asociada a la medición de caudales, no ha sido estudiada considerando el sistema globalmente. Se requiere del conocimiento y la integralidad de los diferentes componentes del sistema. Además es preciso determinar el cómo y de qué forma se propaga la incertidumbre en cada volumen de agua que interviene en el cálculo del balance hídrico local o global, ya que de este balance se deriva el cálculo de diferentes indicadores como el IANC o el IPUF (Índice de Pérdidas de Agua por Usuario Facturado) que miden la eficiencia con que se administra el sistema y es la base para la toma de decisiones e inversión de recursos y a los cuales tampoco se les evalúa su nivel de incertidumbre o su nivel de confiabilidad.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

En este trabajo se propone discutir la necesidad de incluir aspectos metrológicos en el análisis de la incertidumbre en el proceso de cálculo del balance hídrico de un sistema de acueducto a través del análisis de incertidumbre por componentes.

El enfoque de la investigación es la identificación y cuantificación de la propagación de la incertidumbre de medición de cada uno de los componentes del cálculo del balance hídrico, definido por el IWA y utilizado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá consolidados en el desarrollo y aplicación de una herramienta computacional de fácil uso y amigable con el usuario.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

A continuación se listan tres objetivos específicos que se perseguirán para lograr el objetivo principal:

1. Definir un modelo conceptual que permita entender, caracterizar y esquematizar los flujos de datos e información que se emplean en la determinación del balance hídrico definido por el IWA para estudiar el nivel de aplicación en el Sistema de Acueducto de Bogotá considerando tipos de datos, frecuencia y escalas de registro, tecnología de los equipos de medición, expresiones matemáticas y tipos de estimaciones realizadas en el balance.

2. Desarrollar una metodología para el estudio de la incertidumbre involucrada en la estimación del balance hídrico del sistema con base en el estudio de cada una de las componentes que intervienen en el mismo.
3. Aplicar la metodología planteada para un sector hidráulico del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá.

## 1.6 Metodología

Con esta investigación se busca estudiar la complejidad del sistema de medición de caudales, la incertidumbre asociada y su propagación en cada uno de los componentes de cálculo del balance hídrico definido por el IWA, tanto la información medida como la estimada.

Se pretende abordar el tema desde una perspectiva probabilística, con la consideración de que en el sistema existen variables aleatorias, y desde una perspectiva posibilística, considerando que en el balance hídrico se realizan estimaciones basadas en sugerencias bibliográficas y en algunos casos en el conocimiento de expertos en el manejo de los procesos de medición.

Durante la investigación se desarrolla una metodología para la estimación cuantitativa de la incertidumbre global del valor de pérdidas físicas de agua. A su vez se propone una herramienta computacional dirigida a lograr un mayor estudio y control de la calidad de los datos en pro de un mejor análisis y gestión de los datos producto de la medición y los resultados de la misma.

Para empezar es necesaria la conceptualización general de todos los flujos de información y el entendimiento de cada uno de los componentes del balance hídrico definido por la IWA, de forma que permitan estudiar la conectividad de todos los elementos que influyen en la medición de caudales para así determinar la incertidumbre individual de cada componente y a su vez la derivada del cálculo global de balance hídrico, que no es más que la propagación de la incertidumbres de los procesos individuales.

La metodología busca estudiar cada componente del balance hídrico definido por el IWA. Las variables y estimaciones son particulares para cada componente del cálculo del balance, por tanto es necesario particularizar las metodologías de estudio para cada caso. Este trabajo se centrará en el estudio de la influencia de variables medibles o con posibilidad física de ser estudiadas y cuantificadas, la determinación de su influencia, impacto y medidas de corrección.

Basados en el enfoque anterior, se busca desarrollar una herramienta computacional que permita el estudio de la incertidumbre de la medición de caudal para un mayor conocimiento del sistema, más cercano a la realidad, la identificación de aquellos procesos de medición o estimación en los que se deba trabajar con mayor rigor y por consiguiente contar con un instrumento que permita a nivel técnico y gerencial tomar mejores decisiones y con la confianza de obtener mejores resultados que permitan optimizar el uso del agua.

La determinación de los componentes que cuentan con mayor incertidumbre y que tengan mayor impacto en la estimación de pérdidas de agua se busca estudiar por medio de análisis de sensibilidad respecto a la influencia de cada componente en el cálculo global del balance hídrico de todo el sistema. De esta manera se obtiene el nivel de sensibilidad del balance hídrico a la variación del nivel de incertidumbre de cada uno de los elementos que la conforman.

Al conocer la forma de cómo se propaga la incertidumbre de las mediciones de caudales se tendrá un mayor control del sistema, estimaciones más aproximadas a la realidad y generación de medidas culturales que tomen en cuenta la incertidumbre inherente a cualquier tipo de medición. En el caso de empresas de servicios públicos, el estudio de la propagación del error en la medición permite contar con información de mayor calidad lo que a su vez permite un mejor manejo de la misma en pro de tomar mejores decisiones y optimizar la utilización de los recursos financieros. De esta forma se espera que esta investigación ratifique la importancia de la rigurosidad de la medición y obtención de estimaciones de tal forma que los resultados obtenidos del procesamiento de los mismos sean confiables y lo más aproximados a la realidad.

Cabe mencionar que uno de los mayores aportes de esta tesis busca ofrecer a la comisión de regulación de servicios brindar una herramienta que permita hacer comparaciones más justas entre empresas prestadoras del servicio de agua y así medir su real eficiencia.

Con el fin de cumplir con la metodología y objetivos anteriormente propuestos se deberán seguir uno a uno los siguientes pasos:

**Estudio de la metodología del cálculo de balance hídrico de la IWA:** Identificación y estudio de cada uno de los componentes que intervienen en el cálculo del balance hídrico definido por la IWA.

**Identificación de cada uno de los procesos de medición:** Con el apoyo de conocimientos previos relacionados con el área de estudio, literatura específica y entrevistas con funcionarios de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, se identifican secuencialmente los procesos o actividades que intervienen en el flujo de agua para el sistema Bogotano y su identificación dentro del Balance Hídrico definido por la IWA.

**Recopilación de protocolos y procedimientos de medición:** Se realiza una investigación detallada de los protocolos y procedimientos de la medición de caudales y volúmenes asociados a cada uno de los procesos identificados en el flujo del agua determinados en la actividad anterior.

**Asimilación de la información:** Se estudia la información recopilada en las actividades 1 y 2, se detalla y se conceptualizan los procesos en sesiones con el director y en reuniones con funcionarios de la EAAB E.S.P

**Caracterización de la información:** Se identifican las expresiones matemáticas, las escalas de tiempo de registro, las escalas de reporte de datos, los principios de funcionamiento tecnológico de equipos, la transferencia de datos en los diferentes niveles de medición y los procedimientos del procesamiento de la información suministrada por la EAAB E.S.P asociada a la estimación de cada uno de los componentes del balance hídrico determinados por la IWA.

**Esquematación de procesos:** Se selecciona una herramienta gráfica que permita ilustrar tanto el flujo de agua como el flujo de información asociada con la medición de caudales en el Sistema de Acueducto de Bogotá, que involucre la forma y datos necesarios para la determinación del Balance Hídrico. Se escoge la herramienta gráfica considerando dos alternativas, diagramas de flujo o diagrama de bloques. Se realiza la conceptualización de los procesos de toma y procesamiento de datos considerando herramientas como Microsoft office Visio.

**Consolidación del marco conceptual:** Se define el marco conceptual de la investigación por medio del entendimiento de las ecuaciones base que definen cada componente del balance hídrico y se define la incertidumbre de cada uno por medio de un desarrollo matemático que permita su estimación y el estudio de su correspondiente propagación. En esta fase se requiere del estudio de cada una de las variables y constantes que intervienen en los procesos, la identificación de las fuentes de incertidumbre y el análisis detallado de las mismas para su correspondiente modelación.

**Selección de Sector hidráulico:** Se selecciona un sector hidráulico para la reproducción del balance hídrico definido por la IWA y la posterior aplicación de la metodología para la estimación de la incertidumbre en el cálculo del balance hídrico. La selección del sector hidráulico se realizará de acuerdo a un bajo nivel de complejidad, un fácil acceso a los datos y a una alta calidad y cantidad de información y conocimiento disponibles, ya que de esta forma se garantizará la realización de un buen ejercicio.

**Protocolo de modelación:** Teniendo como base la estructura de la metodología para el cálculo de la incertidumbre en el cálculo del balance hídrico, se desarrolla un protocolo de modelación con el objetivo de cuantificar y comparar la incertidumbre de cada uno de los caudales que componen el cálculo del balance hídrico planteado por la IWA. De esta forma se logra la identificación de los componentes del balance hídrico que mayor impacto tienen en todo el sistema. Para esto, se contemplan las siguientes subactividades:

- Estudio y caracterización previa de la información: series de tiempo, funciones de correlación y periodicidad de los datos para la optimización de su manejo.



- Estudio de los procesos de procesamiento de la información para su correspondiente reproducción en rutinas y subrutinas que hagan eficientes los cálculos.
- Identificación de ecuaciones, variables, constantes y aproximaciones que intervienen en el modelo conceptual definido y son susceptibles de ser estudiadas.
- Estructuración de la programación de las ecuaciones definidas tanto para el cálculo de cada componente del balance como su correspondiente incertidumbre.
- Desarrollo de código computacional, desde la definición del lenguaje de programación, la identificación de funciones a utilizar y el desarrollo de rutinas y subrutinas para el desarrollo de la estructura definida en el paso anterior.
- Definición del tipo y forma de presentación numérica y gráfica de los resultados que se esperan tener.
- Aplicación de la herramienta al sector hidráulico escogido con base en la información suministrada por la Empresa de Acueducto de Bogotá.

**Simulación de escenarios con base en análisis de sensibilidad de cada variable:** Se requiere realizar un análisis de identificabilidad y sensibilidad de los parámetros o variables asociadas al modelo con el fin de definir su influencia tanto en la componente como en el cálculo global.

**Análisis de resultados:** En esta actividad se comparan los resultados simulados en cada uno de los escenarios propuestos con el fin de obtener conclusiones valiosas del estudio realizado.

## 1.7 Contenido del documento

Para presentar un desarrollo secuencial y lógico de la investigación, este documento ha sido dividido en seis capítulos.

El segundo capítulo presenta una revisión del estado del arte. Inicia con la definición de cada uno de los componentes que intervienen en el cálculo del balance hídrico definido por el IWA, la teoría de desagregación de pérdidas, tanto técnicas como comerciales, y la determinación de los indicadores de gestión más usados. Hace un repaso por conceptos relacionados con error, incertidumbre, clases de incertidumbre y propagación de la misma. Realiza un cuestionamiento sobre la confiabilidad de la información producto del

cálculo del balance hídrico. Continúa con la revisión general de la normatividad vigente en nuestro país en torno al control de pérdidas por parte de los entes de regulación y finaliza con la presentación de los niveles de pérdidas a nivel nacional e internacional.

El tercer capítulo continúa con una descripción del funcionamiento del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá. El flujo del agua a través del sistema y la toma de datos en cada uno de los componentes del mismo. Realiza una descripción del flujo y tratamiento de información para el cálculo del balance hídrico y la determinación de indicadores de desempeño como el IANC. Así como la presentación de datos técnicos y comerciales destacables en este sistema y algunas particularidades del mismo.

El cuarto capítulo presenta el desarrollo del modelo conceptual base del problema en estudio. Se presenta el estudio individual de cada uno de los componentes del balance hídrico. La determinación de las expresiones matemáticas que lo definen. La estimación de las incertidumbres asociadas a cada componente y el estudio de su propagación en la determinación de pérdidas físicas y comerciales. Se define la macroecuación de propagación de errores y se define el tipo de modelación más apropiada para aplicar.

El cuarto quinto presenta los códigos de programación implementados en MATLAB para aplicar la metodología de estimación de la incertidumbre en el cálculo del balance hídrico. Se presenta la aplicación del programa a un sector hidráulico de acueducto previamente escogido y sus correspondientes limitaciones. Posteriormente se presenta los resultados de la implementación y los resultados basados en un análisis de sensibilidad para medir la evaluación de la influencia de cada parámetro en el cálculo de la incertidumbre global. Finalmente se realiza un análisis de tales resultados.

El sexto capítulo formula conclusiones y presenta recomendaciones específicas y generales para continuar desarrollando investigaciones relativas a la incertidumbre presente en el cálculo del balance hídrico de un sistema de acueducto.

El séptimo capítulo presenta una descripción detallada de las referencias bibliográficas citadas en el cuerpo de este documento. Éstas sirvieron como fuente de información y sirven como punto de partida en la revisión del estado del arte de futuras investigaciones en temas relacionados o afines.

## 2. Estado del Arte

### 2.1 Balance hídrico

Un balance hídrico tiene como objetivo rastrear y contabilizar cada componente de agua que se añade y se deduce de un sistema de abastecimiento de agua dentro de un periodo definido. Un balance hídrico busca así identificar todos los componentes de consumo y pérdidas en un formato estandarizado. [7] Un balance hídrico claramente definido es el primer paso para evaluar las pérdidas de agua o agua no facturada y en manejar las fugas en las redes de distribución de agua.

Cuando se elabora el cálculo del balance hídrico, es extremadamente importante recordar que la exactitud de los volúmenes de pérdida de agua depende de la exactitud y calidad de datos utilizados en el cálculo. Los resultados de un cálculo de balance hídrico serán tan buenos como los datos utilizados para generarlo. Por tanto, una medición confiable de todos los volúmenes de agua que ingresan y salen del sistema es un requisito fundamental. Un balance hídrico se basa no solamente en mediciones, sino también en estimados de producción de agua, consumo y pérdidas, por tanto la validación de los datos desempeña un papel clave en determinar los volúmenes de pérdidas de agua.

Los componentes del balance de agua se pueden medir, estimar o calcular usando un número de técnicas que deben combinarse para lograr resultados confiables. [8] Las técnicas más importantes son (a) el balance hídrico anual desde arriba hacia abajo y (b) la evaluación de pérdidas reales desde abajo hacia arriba.

La IWA desarrolló el balance hídrico anual desde arriba hacia abajo como un método de buenas prácticas. El método desde arriba hacia abajo requiere que los medidores de flujo

y los contadores de agua del cliente se instalen y lean por un periodo de al menos un año. Este método apunta a determinar las pérdidas reales anuales en general en  $m^3/a$ . Para llevar a cabo el balance hídrico es fundamental trabajar de acuerdo con la siguiente terminología estándar de la IWA:

**Tabla 2.1 – Balance Hídrico IWA**

Volumen de entrada al sistema $V_i$	Consumo autorizado $V_A$	Consumo autorizado facturado $V_{AF}$	Agua facturada exportada	Agua facturada	
			Consumo facturado medido		
			Consumo facturado no medido		
		Consumo autorizado no facturado $V_{AuNF}$	Consumo no facturado medido	Agua no facturada	
	Consumo no facturado no medido				
	Pérdidas de agua $Q_P$	Pérdidas aparentes $V_{PA}$	Consumo no autorizado		Agua no facturada
			Inexactitudes de los medidores y errores de manejo de datos.		
		Pérdidas reales $V_{PR}$	Fugas en las tuberías de aducción, conducción y distribución.		
Fugas y reboses en los tanques de almacenamiento					
	Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente				

El procedimiento de cálculo del balance hídrico se realiza a través de una hoja de trabajo u hoja de cálculo en la cual se enumeran y resumen todos los componentes de la producción de agua. Los pasos necesarios para tales cálculos se resume en los siguientes seis pasos:

1. Determinación del volumen de ingreso del sistema  $V_i$
2. Determinación / estimación del consumo autorizado facturado  $V_{AF}$
3. Determinación / estimación del consumo autorizado no facturado  $V_{AuNF}$
4. Cálculo del consumo autorizado  $V_A = V_{AF} + V_{AuNF}$
5. Estimación de las pérdidas aparentes  $V_{PA}$
6. Cálculo de las pérdidas de agua reales  $V_{PR} = V_P - V_{PA}$

A continuación la definición de cada uno de los componentes del sistema y su correspondiente denominación:

**Tabla 2.2 – Desagregación detallada Balance Hídrico IWA**

Volumen de entrada al sistema (A) Vi	Agua exportada (B)	Consumo autorizado Va (P)=(G)+(O)	Consumo autorizado facturado Vaf (G)=(B)-(F)	Agua facturada	Agua exportada facturada (B)		
	Agua suministrada		Consumo autorizado no facturado Vanf (O)=(H)-(N)		Agua no facturada	Consumo facturado medido (C)+(D)	Consumo doméstico facturado medido (C)
						Consumo facturado no medido (E)+(F)	Consumo no doméstico facturado medido (D)
						Consumo no facturado medido (H)+(I)+(N)	Consumo doméstico facturado no medido (E)
				Consumo no doméstico facturado no medido (F)			
			Consumo doméstico no facturado medido (H)				
			Consumo no facturado no medido (J)+(K)+(L)+(M)	Consumo no doméstico no facturado medido (I)			
				Agua utilizada por la empresa de agua (N)			
				Usuarios autorizados no facturados medidos (J)			
			Pérdidas de agua Vp (U)=(A)-(P)	Pérdidas comerciales Vpa (T)=(Q)-(S)	Agua no facturada	Consumo no autorizado (Q)+(R)	Consumo doméstico no facturado no medido (K)
							Consumo no doméstico no facturado no medido (L)
				Pérdidas técnicas Vpr = Vp-Vpa (V)=(U)-(T)	Fugas en las tuberías de transmisión y distribución	Fugas y reboses en los tanques de almacenamiento	Usuarios autorizados no facturados no medidos (M)
							Consumo a través de conexiones ilegales (Q)
							Consumo a través de medidores rotos y puenteados (R)
				Pérdida de agua por errores de manejo de información (S)			
				Fugas			
				Fugas en redes ciclo I			
				Pérdidas en redes oficiales			
				Fugas en las tuberías de transmisión y distribución			

Tabla 2.3 – Componentes Balance Hídrico IWA

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
<b>A</b>	Volumen de entrada al Sistema $V_i$	<p>Corresponde al agua producida y entregada al sistema para su distribución. Dependiendo de la unidad hidráulica estudiada, el volumen de entrada al sistema se mide en algún punto determinado como punto de inicio para el cálculo del balance. Si se deseara estudiar toda Bogotá la medición se debe tomar a la salida de las plantas de tratamiento de agua.</p> <p>Su determinación se realiza con base en los datos de los medidores de flujo ubicados en el o los puntos de inicio.</p>	Medido
<b>B</b>	Agua exportada $V_{exp}$	<p>Corresponde a aquellos volúmenes de agua que no ingresan al sistema de distribución principal sino que son suministrados a otros sistemas independientes de los cuales no se tiene control a partir del punto de suministro.</p> <p>Al igual que los volúmenes de entrada al sistema, la cuantificación del volumen de agua exportada se determina a partir de mediciones registradas en los medidores ubicados en el punto de suministro al sistema externo. Con base en estas mediciones es con las que generalmente se realiza la facturación o venta de agua a estos sistemas externos.</p>	Medido
<b>C</b>	Consumo doméstico facturado medido	Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos medidos facturados a partir de los registros de los micromedidores o registro de red.	Medido
<b>D</b>	Consumo no doméstico facturado medido	Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos medidos facturados a partir de los registros de medidores o registro de red.	Medido
<b>E</b>	Consumo doméstico facturado no medido	<p>Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos o de uso residencial no medidos facturados. No medidos por diferentes razones, entre ellas consumos realizados por los usuarios en proceso de normalización (inclusión en la base de datos de suscriptores) a los que no se les haya podido aplicar el cobro con macromedidores de frontera o mediante la instalación de micromedidores alquilados y que por ello no tengan aparato de medición.</p> <p>En este grupo se incluyen usuarios con facturación provisional o también llamados Ciclo I: Son aquellos cuyas condiciones operacionales y técnicas de suministro (ausencia de redes locales, o servicio discontinuo) no garantizan la prestación del servicio con la continuidad y presión requeridas según los parámetros de calidad del servicio del prestador. También se incluyen usuarios que se localizan en zonas de afectación vial o rondas de cursos de agua y que en general no han formalizado su legalidad y propiedad ante el municipio. [3]</p>	Estimado

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
		<p>En la mayoría de empresas este valor se estima con base en el consumo promedio de otros suscriptores del mismo estrato socioeconómico, medidos con instrumentos, durante los últimos tres períodos de facturación. Sin embargo se recomienda hacer un estimado más apropiado para los clientes facturados sin medidores de agua. No se recomienda simplemente asignar cifras de consumo de usuarios medidos porque las tarifas medidas usualmente crean comportamientos de consumo diferentes que las tarifas planas. Por lo tanto, se debe determinar el consumo doméstico no medido promedio utilizando monitoreos individuales de usuarios (MIU) para una muestra al azar de usuarios. Un método alternativo es usar monitoreos de zona (MZ) si el área en investigación no está sujeta a grandes volúmenes de fugas no detectadas. [9]</p>	
<b>F</b>	Consumo no doméstico facturado no medido	<p>Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos (predios de uso industrial, comercial, institucional, especial, etc.) no medidos pero facturados.</p> <p>La determinación de estos consumos se establece con base en aforos individuales que realizaran las Empresa, utilizando los promedios de consumo, medidos con instrumentos, de predios de actividad económica similar, durante los últimos tres períodos de facturación, o en su defecto utilizando tablas de cálculo de consumos establecidas para tal fin. [3]</p> <p>En otros casos se establecen con base en estudios o estimaciones bibliográficas.</p>	Estimado
<b>H</b>	Consumo doméstico no facturado medido	<p>Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos medidos pero no facturados por excepciones especiales definidas por la Empresa. Su cuantificación se realiza con base en registros de medición para cada uno de estos usuarios.</p>	Medido
<b>I</b>	Consumo no doméstico no facturado medido	<p>Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos medidos pero no facturados por excepciones especiales definidas por la Empresa. Su cuantificación se realiza con base en registros de medición para cada uno de estos usuarios.</p>	Medido
<b>J</b>	Usuarios autorizados no facturados medidos	<p>Corresponde al agua utilizada por todos usuarios autorizados, medidos y no facturados, por ejemplo usuarios en zonas de afectación, en emergencias e hidrantes. Su cuantificación se realiza con base en registros de medición para cada uno de estos usuarios.</p>	Medido
<b>K</b>	Consumo doméstico no facturado no medido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos no medidos y no facturados. Entre ellos se encuentran consumos no facturados a suscriptores sin medidor localizados en barrios no legalizados que consumen más agua que el consumo presuntivo con que se facturen. Conjuntos</li> </ul>	Estimado

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
		habitacionales que cuentan con puntos de consumo en áreas comunes y servicios generales que no son facturados. Su estimación se realiza con base en monitoreos individuales de usuarios (MIU) o monitoreos zonales (MZ).	
L	Consumo no doméstico no facturado no medido	Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos no medidos y no facturados que para su estimación requiere de estudios detallados en campo o en su defecto, sugerencias de estimación bibliográficas.	Estimado
M	Usuarios autorizados no facturados no medidos	Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios autorizados: Por ejemplo irrigación de parques, limpieza de calles con agua, brigadas de bomberos, volúmenes suministrados para aseo de espectáculos transitorios, etc. Su estimación se realiza con base en estudios o sugerencias de estimación bibliográficas. Y depende mucho del control y operación que tenga la empresa en la realización de estas actividades.	Estimado
N	Agua utilizada por la empresa de agua	<p>Corresponde a los volúmenes de agua necesarios para atender determinados servicios no comercializados de carácter público o bien para mantener el funcionamiento apropiado de la red de distribución o de expansión del servicio de acueducto, se denominan también desperdicios por mantenimiento o consumos técnicos. Estos consumos varían de acuerdo al tipo de operación de la empresa, a continuación los más representativos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavado de tanques de almacenamiento del sistema con agua suministrada por el prestador</li> <li>• Consumo de equipos de succión presión para mantenimiento de alcantarillado.</li> <li>• Suministro no comercializado a través de carrotanques para el desarrollo de actividades propias.</li> <li>• Drenaje de redes de acueducto para operaciones de mantenimiento o labores especiales. Lavado o limpieza de redes.</li> <li>• Daños presentados en la Red Matriz, contabilizados desde el momento en que se reportan hasta que son reparados, incluyendo el volumen necesario para desaguado para la reparación.</li> <li>• Operación de hidrantes: Se utiliza la determinación del volumen utilizando información de presión en la red, diámetro de la boquilla de salida y el tiempo que dura la operación. [3]</li> </ul> <p>Su cuantificación se realiza a través de la medición detallada de los volúmenes utilizados en cada actividad de acuerdo a los manuales de operación de cada empresa. Cuando no se cuenta con estas mediciones puntuales se realizan estimaciones con base a estudios. Para el caso de Alemania su valor es 1.3-1.5 % del Qi (con tratamiento), 1 % de Qi (sin tratamiento). [10]</p>	Medido
Q	Consumo a través de conexiones ilegales	Corresponde a los estimados del consumo de conexiones ilegales que son determinados a través de registros anteriores cuando los hay, o estudios casa por casa en zonas de prueba (monitoreos individuales de usuarios - MIU) o monitoreos zonales (MZ). Los principales aportantes a estos consumos por	Estimado



ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
		<p>conexiones ilegales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clandestinos masivos: Barrios no legalizados no incluidos en el Ciclo I</li> <li>• Clandestinos dispersos: Predios no facturados en barrios legales</li> <li>• Usuarios no facturados: Suscriptores de la empresa que no se facturan o se facturan con parámetros que no corresponden.</li> <li>• Subestimación de consumo debida a:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Clientes sin medidores</li> <li>○ Clientes con medidores no leídos</li> <li>○ Clientes con medidores fuera de servicio o averiados</li> </ul> </li> <li>• Fraudes: Acometidas clandestinas o adulteraciones de medidores</li> </ul> <p>Cuando no se pueden hacer monitoreos puntuales o zonales se recurre a estimaciones globales bibliográficas tales como:</p> <p>Estimado para Alemania: QAL = 1.5-2.0% de QI. [11] Primer estimado para países en desarrollo: 5% de QI</p>	
R	Consumo a través de medidores rotos y punteados	<p>Corresponde a estimados del consumo de medidores rotos o punteados debidos a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Error de medición o submedición por:               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Envejecimiento de los medidores</li> <li>▪ Medidores mal calibrados</li> <li>▪ Tipos de medidores no adecuados</li> </ul> </li> <li>• Fugas internas no medidas: Fugas en las instalaciones internas de los usuarios con bajos caudales a los que el medidor no es sensible.</li> </ul> <p>Generalmente se recurren a estimaciones bibliográficas. Para el consumo a través de medidores rotos y punteados existe un primer estimado de 0.25 % de QI. [12]</p>	Estimado
S	Pérdida de agua por errores en el manejo de la información	<p>Corresponde a pérdida de agua a causa errores en el manejo de la información, como por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cifras decimales tomadas</li> <li>• Completitud de información</li> <li>• Conversión de unidades</li> </ul> <p>Errores de lectura</p>	Estimado
G	Consumo Autorizado Facturado	Corresponde al volumen de agua que se entrega y se factura al cliente exitosamente, el cual genera	Calculado

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
	<p>Vaf</p> <p><math>(G)=(B)-(F)</math></p> <p>(Incluye ciclos y bloques)</p>	<p>ingresos económicos para la empresa.</p> <p>Para su determinación es necesario identificar a todos los clientes registrados en los registros de facturación (hogares, comercios y consumidores industriales, etc.).</p> <p>Se calcula como la suma de los siguientes componentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua exportada (B)</li> <li>• Consumo doméstico facturado medido (C)</li> <li>• Consumo no doméstico facturado medido (D)</li> <li>• Consumo doméstico facturado no medido (E)</li> <li>• Consumo no doméstico facturado no medido (F)</li> </ul>	
O	<p>Consumo Autorizado No facturado Vanf</p> <p><math>(O)=(H)-(N)</math></p>	<p>Corresponde a consumos que se autorizan y se saben a donde van pero no representan ingresos económicos para la Empresa. Su estimación se realiza sumando los siguientes componentes, medidos y no medidos, anteriormente definidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo doméstico no facturado medido (H)</li> <li>• Consumo no doméstico no facturado medido (I)</li> <li>• Usuarios autorizados no facturados medidos (J)</li> <li>• Consumo doméstico no facturado no medido (K)</li> <li>• Consumo no doméstico no medido no facturado (L)</li> <li>• Usuarios autorizados no facturados no medidos (M)</li> <li>• Agua utilizada por la empresa de agua (N)</li> </ul>	Calculado
P	<p>Consumo autorizado Va</p> <p><math>(P)=(G)+(O)</math></p>	<p>Corresponde al volumen de agua medida y/o no medido cuyo destino se conoce y se ha autorizado. Parte de estos consumos son realizados por clientes suscritos y facturados, otros por la misma empresa de agua para su operación y mantenimiento y otro por consumidores autorizados a los que se le ha autorizado su uso pero no se les cobra por estar dentro de un régimen de excepciones definido por la empresa. Algunos de estos consumos son medidos otros no, solamente pueden ser estimados.</p> <p>Su cálculo corresponde a la suma entre: Consumo Autorizado Facturado Qaf (G) y el Consumo Autorizado No facturado Qanf (O)UU</p>	Calculado
T	<p>Pérdidas Comerciales Vpa</p> <p><math>(T)=(Q)-(S)</math></p>	<p>También conocidas como pérdidas aparentes. Corresponden al consumo no autorizado, ya sea clandestino o ilegal masivos o dispersos, consumo legal no facturable y errores de micromedición, es decir, la suma de los siguientes componentes descritas en numerales anteriores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo a través de conexiones ilegales (Q)</li> </ul>	Calculado

ID	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo a través de medidores rotos y puenteados (R )</li> <li>• Pérdida de agua por errores de manejo de información (S)</li> </ul>	
<b>U</b>	Pérdidas de agua $V_p$ $(U)=(A)-(P)$	Corresponde al volumen de agua perdida entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a varias razones. Se puede expresar como la diferencia entre el volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado y se compone de pérdidas aparentes y reales. Su cálculo se obtiene de la diferencia entre el volumen de entrada $V_i$ y el volumen autorizado $V_a$ , anteriormente definidos. Esta diferencia es importante debido a que representa pérdidas económicas para la Empresa.	Calculado
<b>V</b>	Pérdidas Técnicas $V_{pr}$ $(V)=(U)-(T)$	Se denominan pérdidas técnicas o pérdidas reales. Constituyen las fugas desde tuberías de transmisión y distribución, fugas desde conexiones de servicio y fugas desde tanques de almacenamiento.  Corresponden a aquellas debidas a fugas por fallas en los elementos de la red, tales como conductos, conexiones y tanques de almacenamiento. Representan el principal objetivo del cálculo del balance hídrico cuando se trata de identificar aquellas zonas donde existe un gran potencial de realizar inversiones para recuperar tales volúmenes de agua, que son traducidas en ingresos económicos que son recuperados por la Empresa y de esta forma dirigir planes de acción para recuperar tales recursos físicos y monetarios.	Calculado



## 2.2 Pérdidas de agua $Q_p, (U)=(A)-(P)$

Las pérdidas físicas de agua se trata de volúmenes de agua perdida entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a varias razones. Se puede expresar como la diferencia entre el volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado.

Las causas más conocidas por las que se originan altos valores en los índices de pérdidas de agua potable en un sistema de acueducto son, entre otras las siguientes:

- Avanzada edad de los materiales de las tuberías
- Defectos en construcción de la red y las acometidas
- Pérdidas por estanqueidad en los tanques
- Pérdidas en las plantas de tratamiento medidas en elementos que controlan los procesos
- Submedición o subregistro en la micromedición
- Exactitud de la macromedición
- Limitaciones en la operación y control de la red de distribución
- Altas presiones
- Fugas visibles e invisibles
- Usuarios clandestinos masivos y dispersos
- Consumos fraudulentos de usuarios legales
- Desconocimiento de usuarios reales y potenciales
- Métodos no apropiados de facturación, cartera y recaudo
- Existencia de asentamientos clandestinos masivos
- Existencia de conexiones directas y servicios suspendidos reconectados.
- Existencia de fraudes y de consumos atípicos
- Existencia de pérdidas comerciales por errores de facturación

Las pérdidas de agua se dividen en pérdidas aparentes o comerciales y pérdidas reales o técnicas. Las pérdidas aparentes se pueden subdividir en consumo no autorizado, inexactitudes de medición y errores en el manejo de datos. Las pérdidas reales se constituyen de fugas desde tuberías de transmisión y distribución, fugas desde conexiones de servicio y fugas desde tanques de almacenamiento.

## 2.2.1 Pérdidas Comerciales Qpa

### Consumo No Autorizado

La extracción de agua no autorizada representa una fuente considerable de pérdidas en muchos países y aparece de maneras muy diferentes, por ejemplo en las conexiones ilegales o en los medidores vandalizados o manipulados de los clientes o en los medidores que los clientes evitan, en la extracción ilegal del agua de las tuberías contra incendios así como en los sobornos y corrupción a los empleados que leen los medidores u a otro personal de la empresa. A continuación las fuentes más representativas de estos consumos no autorizados:

**Volumen consumo clandestino:** es la parte del volumen consumido por los usuarios que no es facturado debido al uso de conexiones ilegales de usuarios clandestinos, sean estos dispersos o localizados en asentamientos masivos. También se incluyen consumos no autorizados a través de hidrantes. [3]

Clandestinos dispersos: Cuando se encuentren usuarios aislados que no pertenecen al catastro actual, cuyo consumo de agua potable se confirma en terreno, denominados clandestinos dispersos, se debe revisar la localización del inmueble y recolectar los parámetros de facturación, con el fin de incorporarlos en el catastro de usuarios e iniciar el proceso de facturación y cobro. Los usuarios clandestinos dispersos se localizan sobre zonas con redes oficiales, en medio de otros predios con servicio normal, pero que a diferencia del usuario fraudulento, no mantienen una relación de legalidad con la Empresa prestadora del servicio.

Una empresa que preste servicios de gestión del agua necesita estimar el número de conexiones ilegales para cuantificar el uso no autorizado del agua, por ejemplo conduciendo una encuesta casa por casa en una zona piloto (MIU). Luego, el número estimado de conexiones ilegales, tiene que multiplicarse por el tamaño del hogar típico y el consumo de agua per capita. Las conexiones ilegales que los trabajadores de la empresa de agua descubren accidentalmente deberían así registrarse siempre. El número de medidores rotos, evitados o manipulados también se debería tomar en cuenta en base a información de los lectores de medidores u otro personal de la empresa. [13]

Los clandestinos masivos: Corresponden a todos aquellos desarrollos en los cuales la empresa ha ejecutado gestión social para incorporar residentes que consumen agua en forma ilegal. Estos asentamientos se detectan mediante el análisis de información de oficinas propias de la Entidad prestadora del servicio dedicadas a la atención de comunidades y de la oficina de Planeación Municipal encargada de los trámites de legalización de barrios o bien mediante la aplicación de ayudas de sistemas de información geográfico a través de la comparación de aerofotografías recientes con las coberturas de urbanismo, ejes viales, manzanas y prediales.

Una vez identificados asentamientos clandestinos masivos que toman el agua ilegalmente de la red de acueducto de la Ciudad, se debe realizar gestión comunitaria de concientización del costo del servicio y la necesidad del cobro, para proceder a instalar macromedidores que permitan medir y facturar el consumo de agua potable de estos asentamientos en el punto donde se surten, y distribuir el consumo proporcionalmente entre los inmuebles beneficiarios. [3]

Volumen consumo fraudulento: es la parte del volumen consumido por los usuarios legales que recurren a intervenciones físicas ilegales sobre la red de distribución, la acometida o conexión domiciliaria o sobre el micromedidor, con el propósito de ocultar, disminuir o alterar el consumo real o la lectura del micromedidor. Estos usuarios realizan conexiones ilegales paralelas a la acometida oficial, construcción de by-pass al medidor, adulteración del aparato de medición o manipulación del mismo para que registre a contraflujo. También se presenta el caso de medidores trabados por obsolescencia del aparato, los cuales son detectados en la actividad de lectura o por reporte del propio usuario. [3]

La detección de usuarios fraudulentos y renovación de acometidas consiste en estudiar, detectar y normalizar la situación de consumo de aquellos usuarios. Algunos tipos de defraudación realizado por estos usuarios fraudulentos son:

- En el Medidor (Guaya, imán, medidor gemelo, pitillo / palillo, electroimán, vuelta al medidor, perforacion medidor, rotura anillo, cambio pasador, rotura dientes piñón, aceite caliente)
- Medidores con posible manipulación, (sellos rotos, cúpula rota)
- Paso directo

- Bypass acometida
- Hurto de agua en hidrante
- Conexiones no autorizadas, no reportadas y por tanto no facturados.
- Zonas comunes no medidas, no reportadas.
- Lotes con punto de consumo sin facturación
- Taponamientos no ejecutados

Volumen no facturado de usuarios activos: es la parte del volumen consumido por los usuarios que no es facturado a causa de errores de lectura de facturación de usuarios legales, o no-incorporación a facturación de usuarios legales.

Volumen no facturado por subestimación de consumo: es el volumen consumido por encima del facturado para usuarios que carecen de medidor (facturación estimada por promedio o usuarios Ciclo I).

### **Imprecisiones en la medición (Fugas Internas no medidas, submedición)**

Volumen por error en la medición: es la parte del volumen consumido por los usuarios que no es facturado a causa de la imprecisión originada en la sensibilidad (arranque a bajo caudal) y/o deterioro de exactitud con el tiempo del aparato de medición.

Inexactitudes del medidor: Las pérdidas de medición son frecuentemente la pérdida más común de las pérdidas aparentes. La experiencia muestra que un pequeño porcentaje de agua no se mide o se mide de manera incorrecta debido a errores de medición o a pérdidas crecientes en los medidores de agua. Esto afecta tanto a los medidores de los clientes como a los medidores de flujo de la empresa y puede estar causado por seleccionar medidores inconvenientes, medidores demasiado grandes, por una instalación no correcta y por la no calibración de los medidores, así como debido a un deterioro en el desempeño de muchos medidores a lo largo del tiempo.

Las pérdidas aparentes debidas a inexactitudes del medidor se pueden estimar seleccionando un grupo representativo de contadores domésticos a la vez que se toma en cuenta los distintos tipos, marcas, tamaños y grupos de edad de contadores y se los verifica en un banco de pruebas. Los grandes medidores de flujo también se pueden



probar in-situ y en operación por medio de medidores de flujo portátiles calibrados. Las inexactitudes del medidor promedio (porcentaje de sobre-registro o sub-registro) para cada grupo de medidores se pueden aplicar entonces a todo el parque de medidores. [7]

El personal que lee medidores puede cometer errores de lectura del medidor. Se puede perder los datos del consumo de agua o se los puede cambiar debido a errores sistemáticos en el procesamiento de datos y a los procedimientos de facturación. El consumo no medido (necesidades propias y abastecimiento gratuito para los bomberos, riego de áreas verdes, limpieza de calles, etc.) puede subestimarse mientras que se puede sobreestimar la producción no medida. Las tarifas planas pueden causar un consumo de agua doméstico excesivo que excede de lejos la cantidad presupuestada.

Los errores de manejo de datos se pueden detectar y cuantificar por medio de software de base de datos estándar. Los errores de lectura de los medidores se pueden reducir capacitando continuamente a los lectores de medidores e introduciendo rutinas de trabajo estandarizadas.

Es necesario contrarrestar la exactitud decreciente con el tiempo del aparato de medida, así como la baja sensibilidad en el arranque que presentan algunos tipos de medidores y cambiar aquellos que dejan de funcionar debido al cumplimiento de su vida útil. [3]

### **2.2.2 Pérdidas Técnicas Qpr**

Corresponden a aquellas debidas a fugas por fallas en los elementos de la red, tales como conductos, conexiones y tanques de almacenamiento.

#### **Fugas y daños en la red matriz y en la red de distribución**

##### Clasificación de las fugas

Fugas visibles: Corresponden a todas aquellas fugas que tienen consecuencias visibles que permiten ubicar el punto de rotura sobre la tubería y su consecuente reparación.

Entre estos efectos se cuentan:

- Aparición de agua en la calzada o andenes.
- Manchas de humedad en un muro.

- Infiltración en los sótanos.
- Disminución de presión en la red o en las acometidas.
- Hundimiento de la calzada

Fugas semivisibles: Son aquellas fugas que producen alguno de los siguientes efectos, sin que estos permitan rastrear la ubicación exacta del punto de rotura sobre la red:

- Aparición de agua en la calzada o andenes.
- Infiltración en los sótanos.
- Aparición de agua en las cámaras de electricidad o teléfonos, entre otros.

Fugas no visibles: Existen numerosas fugas no visibles, que no presentan algún efecto que pueda ser percibido de manera evidente. No se traducen en presencia de agua superficial en ninguna de las formas mencionadas. [3]

#### Clasificación por ubicación:

- Troncales de transmisión y distribución
- Conexiones de servicio

Fugas y reboses en tanques: Conducir una prueba volumétrica o de goteo es un método común para identificar pérdidas en tanques de almacenamiento.

#### Clasificación por tamaño y tiempo de fuga

- Reportadas o visibles: En troncales, depende de la presión y tamaño de la fuga, tipo de suelo y superficie.
- No reportadas u ocultas: Caudales mayores a 250 l/h a 50 m de presión pero debido a las condiciones no favorables no aparecen en la superficie.
- De fondo: Comprende pérdidas de agua con caudales menores a 250 l/h a 50 m de presión. No se pueden detectar utilizando métodos de detección acústicos de fugas. Se asume que muchas fugas de fondo nunca se detectan ni reparan sino que fugan hasta que se reemplaza eventualmente la parte defectuosa

#### Cuatro factores específicos al sistema que son clave para las pérdidas reales de agua:

- La longitud de las troncales
- El número de conexiones de servicio
- La ubicación del medidor del cliente

- La presión operativa promedio en el sistema (cuando el sistema está presurizado)

Varios estudios de campo y laboratorio han probado la alta sensibilidad de la fuga a la presión: elevar la presión incrementará la fuga.

## **2.3 Confiabilidad de los cálculos de balance hídrico**

Los resultados de un cálculo de balance hídrico serán tan buenos como los datos utilizados para generarlo. En general, un balance hídrico se basa no solamente en mediciones, sino también en estimados de producción de agua, consumo y pérdidas como se vio en la sección anterior. Por lo tanto, los volúmenes resultantes del agua no facturada, pérdidas reales y pérdidas aparentes, siempre estarán sujetos a un grado de error mayor o menor. Los errores en determinar los volúmenes de pérdidas reales o aparentes influenciarán el análisis económico de las opciones y pueden llevar a una estrategia inapropiada de reducción de pérdidas de agua. Por lo tanto, es necesario evaluar críticamente los resultados del balance hídrico, tanto medidos, estimados como calculados. Es importante estar tan cerca de las condiciones reales como sea posible de modo que se pueda lograr resultados válidos y útiles. La confiabilidad de la fuente de datos y de la exactitud de los datos es imprescindible, por lo tanto es necesario que sean evaluados de forma crítica. [14]

La confiabilidad describe la medida en que una fuente de datos rinde resultados consistentes, estables y uniformes cada vez a lo largo de mediciones repetidas en las mismas condiciones.

La exactitud se relaciona con errores de medición en los datos de ingreso y en la cercanía de las observaciones, cálculos o estimados, al valor verdadero. En la práctica, no habrá información detallada disponible sobre exactitud y confiabilidad de datos, sin embargo, las empresas de agua deben estar en la capacidad de proveer estimados competentes sobre la banda de exactitud de ciertos datos de ingreso. [14]

### **2.3.1 Límites de confianza de 95 %**

Un enfoque práctico para lidiar con la incertidumbre es tratar de cuantificarla. El uso de los límites de confianza de 95% se ha instaurado como un procedimiento para evaluar el grado de incertidumbre de los componentes individuales del balance hídrico. Estos

límites de confianza de 95% vienen originalmente del cálculo de incertidumbre y se basan en distribuciones normales que expresan que el valor real se halla dentro de la banda de exactitud definida con una probabilidad del 95%. En términos estadísticos, esto significa que el 95% de las observaciones se sitúan en una zona alrededor del valor promedio con una desviación estándar ( $\sigma$ ) de  $\pm 1.96$ . [7]

En la práctica, el uso de límites de confianza o bandas de confianza de 95% significa que los cálculos basadas en datos aproximados tienen límites de confianza más amplios que los cálculos que se hacen con datos más confiables. [15] Para cada componente medido y estimado del balance hídrico, se debe definir bandas de exactitud ( $\pm \dots\%$ ) dentro de las cuales el valor real reside en una probabilidad del 95%. Cuanto más exactos sean los datos, menores serán los límites superior e inferior de la banda de exactitud. Las bandas de exactitud deben tomar en cuenta los datos tanto sobre la confiabilidad como sobre la exactitud.

El uso de límites de confianza de 95% ayuda a identificar componentes con una gran varianza y por tanto los impactos más grandes en la exactitud de los resultados finales del balance hídrico. Una vez que se identifican se deben tomar medidas para mejorar la exactitud de los componentes con mayor impacto de forma que se pueda reducir el impacto en las estrategias de manejo de fugas.

Además, la varianza (varianza  $V = \sigma^2$ ) se puede determinar para cada componente del balance hídrico sobre la base de límites de confianza de 95%. Los componentes con gran varianza tendrán mayor impacto en la exactitud que los volúmenes derivados. Los volúmenes derivados del balance hídrico tendrán entonces un mayor nivel de incertidumbre en base a las varianzas de los datos ingresados respectivos.

La desviación estándar se calcula para cada componente como sigue:

$$\sigma = \frac{Q \cdot BE}{1.96} \quad \text{Ec. 2:1}$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar

Q = Componente del balance hídrico ( $m^3$ )

BE = Banda de exactitud del componente

La varianza ( $V$ ) para cada componente se calcula como sigue:

$$V = \sigma^2 = \left( \frac{Q * BE}{1.96} \right)^2$$

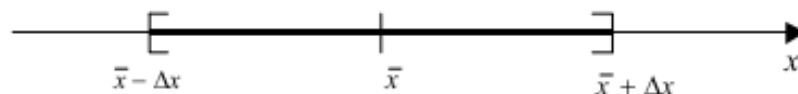
## 2.4 Estudio de Propagación de la incertidumbre

Una magnitud física es un atributo de un cuerpo, un fenómeno o una sustancia, que puede determinarse cuantitativamente, es decir, es un atributo susceptible de ser medido. Ejemplos de magnitudes son la longitud, la masa, la potencia, la velocidad, etc. A la magnitud de un objeto específico que se esté interesado en medir, se llama *mesurando*. Por ejemplo, si se está interesado en medir la longitud de una barra, esa longitud específica será el *mesurando*.

Para establecer el valor de un *mesurando* se tiene que usar instrumentos de medición y un método de medición. Asimismo es necesario definir unidades de medición. Por ejemplo, si se desea medir el largo de una mesa, el instrumento de medición será una regla. Si se ha elegido el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad será el metro y la regla a usar deberá estar calibrada en esa unidad (o submúltiplos). El método de medición consistirá en determinar cuántas veces la regla y fracciones de ella entran en la longitud buscada.

En ciencias e ingeniería, el concepto de error tiene un significado diferente del uso habitual de este término. Coloquialmente, es usual el empleo del término error como análogo o equivalente a equivocación. En ciencia e ingeniería, el error, como se verá más adelante, está más bien asociado al concepto de incerteza en la determinación del resultado de una medición. Más precisamente, lo que se procura en toda medición es conocer las cotas (o límites probabilísticos) de estas incertezas. Gráficamente, se busca establecer un intervalo  $x - \Delta x \leq x \leq x + \Delta x$  como el de la Ilustración 2-1, donde con cierta probabilidad, se pueda decir que se encuentra el mejor valor de la magnitud  $x$ . Este mejor valor  $x$  es el más representativo de la medición y al semiancho  $\Delta x$  se denomina la incerteza o error absoluto de la medición. [16]

**Ilustración 2-1 - Intervalo asociado al resultado de una medición**



NOTA: Nótese que, en lugar de dar un único número, se define un intervalo. Al valor representativo del centro del intervalo ( $\bar{x}$ ) se llama el mejor valor en cuestión. Al semiancho del intervalo ( $\Delta x$ ) se denomina incertidumbre o error absoluto de la medición.

En todo proceso de medición existen limitaciones dadas por los instrumentos usados, el método de medición, el observador (u observadores) que realizan la medición. Asimismo, el mismo proceso de medición introduce errores o incertezas. Por ejemplo, cuando se usa un termómetro para medir una temperatura, parte del calor del objeto fluye al termómetro (o viceversa), de modo que el resultado de la medición es un valor modificado del original debido a la inevitable interacción que se debe realizar. Es claro que esta interacción podrá o no ser significativa: Si se está midiendo la temperatura de un metro cúbico de agua, la cantidad de calor transferida al termómetro puede no ser significativa, pero si lo será si el volumen en cuestión es de una pequeña fracción del mililitro.

Tanto los instrumentos que se usan para medir como las magnitudes mismas son fuente de incertezas al momento de medir. Los instrumentos tienen una precisión finita, por lo que, para un dado instrumento, siempre existe una variación mínima de la magnitud que puede detectar. Esta mínima cantidad se denomina la apreciación nominal del instrumento. Por ejemplo, con una regla graduada en milímetros, no se puede detectar variaciones menores que una fracción del milímetro.

A su vez, las magnitudes a medir no están definidas con infinita precisión. Si se quiere medir el largo de una mesa es posible que al usar instrumentos cada vez más precisos se empiece a notar las irregularidades típicas del corte de los bordes o, al ir aun más allá, finalmente se detecte la naturaleza atómica o molecular del material que la constituye. Es claro que en ese punto la longitud dejará de estar bien definida. En la práctica, es posible que mucho antes de estos casos límites, la falta de paralelismo en sus bordes haga que el concepto de la “longitud de la mesa” comience a hacerse cada vez menos definido, y a esta limitación intrínseca se denomina incerteza intrínseca o falta de definición de la magnitud en cuestión.

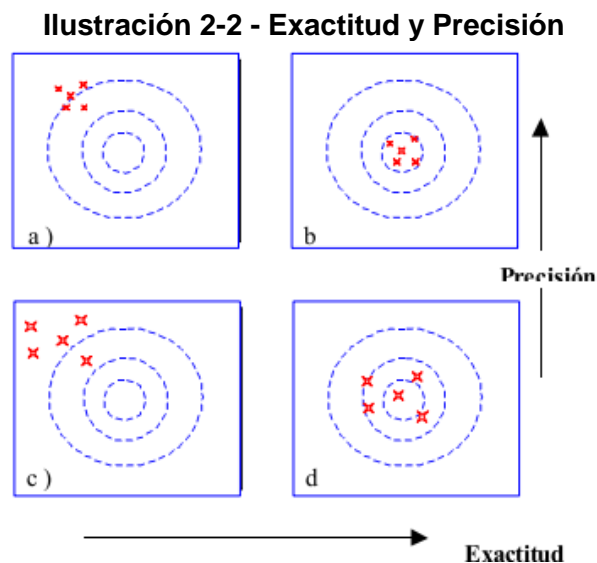
Otro ejemplo sería el caso en que se cuenta la cantidad de partículas alfa emitidas por una fuente radioactiva en 5 segundos. Sucesivas mediciones arrojarán diversos

resultados (similares, pero en general distintos). En este caso, de nuevo, se está frente a una manifestación de una incerteza intrínseca asociada a esta magnitud “número de partículas emitidas en 5 s”, más que al error de los instrumentos o del observador.

Otra fuente de error que se origina en los instrumentos además de la precisión es la exactitud de los mismos. Como se vio, la precisión de un instrumento o un método de medición está asociada a la sensibilidad o menor variación de la magnitud que se pueda detectar con dicho instrumento o método. Así, se dice que un tornillo micrométrico (con una apreciación nominal de 10 mm) es más preciso que una regla graduada en milímetros; o que un cronómetro es más preciso que un reloj común, etc.

### 2.4.1 Conceptos básicos

La exactitud de un instrumento o método de medición está asociada a la calidad de la calibración del mismo. Suponiendo que el cronómetro que se usa es capaz de determinar la centésima de segundo pero adelanta dos minutos por hora, mientras que un reloj de pulsera común no lo hace. En este caso se dice que el cronómetro es todavía más preciso que el reloj común, pero menos exacto. La exactitud es una medida de la calidad de la calibración de un instrumento respecto de patrones de medida aceptados internacionalmente. En general los instrumentos vienen calibrados, pero dentro de ciertos límites. Es deseable que la calibración de un instrumento sea tan buena como la apreciación del mismo. La Ilustración 2-2 se ilustra de modo esquemático estos dos conceptos.



Esta figura ilustra de modo esquemático los conceptos de precisión y exactitud. Los centros de los círculos indican la posición del “verdadero valor” del mesurando y las cruces los valores de varias determinaciones del centro. La dispersión de los puntos da una idea de la precisión, mientras que su centro efectivo (centroide) está asociado a la exactitud. a) Es una determinación precisa pero inexacta, mientras d) es más exacta pero imprecisa; b) es una determinación más exacta y más precisa; c) es menos precisa que a).

Se dice que se conoce el valor de una magnitud dada, en la medida en que se conocen sus errores. En ciencia consideramos que la medición de una magnitud con un cierto error no significa que se haya cometido una equivocación o que se haya realizado una mala medición. Con la indicación del error de medición se expresa, en forma cuantitativa y lo más precisamente posible, las limitaciones que el proceso de medición usado introduce en la determinación de la magnitud medida.

Es imprescindible en ciencia e ingeniería especificar los errores de medición.

### 2.4.2 Clasificación de los errores

Existen varias formas de clasificar y expresar los errores de medición. Según su origen, los errores pueden clasificarse del siguiente modo:

#### Errores introducidos por el instrumento

**Error de apreciación,  $\sigma_{ap}$ :** si el instrumento está correctamente calibrado la incertidumbre que se tiene al realizar una medición estará asociada a la mínima división de su escala o a la mínima división que se puede resolver con algún método de medición. Nótese que no se dice que el error de apreciación es la mínima división del instrumento, sino la mínima división que es discernible por el observador. La mínima cantidad que puede medirse con un dado instrumento la denominamos apreciación nominal. El error de apreciación puede ser mayor o menor que la apreciación nominal, dependiendo de la habilidad (o falta de ella) del observador. Así, es posible que un observador entrenado pueda apreciar con una regla común fracciones del milímetro



mientras que otro observador, con la misma regla pero con dificultades de visión sólo pueda apreciar 2 mm.

**Error de exactitud,  $\sigma_{\text{exac}}$ :** representa el error absoluto con el que el instrumento en cuestión ha sido calibrado.

**Error de interacción;  $\sigma_{\text{int}}$ :** esta incerteza proviene de la interacción del método de medición con el objeto a medir. Su determinación depende de la medición que se realiza y su valor se estima de un análisis cuidadoso del método usado.

**Falta de definición en el objeto sujeto a medición:** como se dijo antes, las magnitudes a medir no están definidas con infinita precisión. Con  $\sigma_{\text{def}}$  se designa la incertidumbre asociada con la falta de definición del objeto a medir y representa su incertidumbre intrínseca.

En general, en un dado experimento, todas estas fuentes de incertidumbres estarán presentes, de modo que resulta útil definir el error nominal de una medición  $\sigma_{\text{nom}}$ , como:

$$\sigma_{\text{nom}}^2 = \sigma_{\text{ap}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2 + \sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_{\text{exac}}^2 \quad \text{Ec. 2:2}$$

Este procedimiento de sumar los cuadrados de los errores es un resultado de la estadística, y proviene de suponer que todas las distintas fuentes de error son independientes una de otras.

Según su carácter los errores pueden clasificarse en sistemáticos, estadísticos e ilegítimos o espurios.

**Errores sistemáticos:** se originan por las imperfecciones de los métodos de medición. Por ejemplo, si se piensa en un reloj que atrasa o adelanta, o en una regla dilatada, el error de paralaje, etc. Los errores introducidos por estos instrumentos o métodos imperfectos afectarán los resultados siempre en un mismo sentido. El valor de  $\sigma_{\text{exac}}$  sería un ejemplo de error sistemático pero no son lo mismo, los errores de exactitud no son los únicos responsables de los errores sistemáticos. Si se supone por ejemplo el

caso de una balanza bien calibrada que se usa para conocer el peso de las personas en los centros comerciales u otros negocios, como es usual que las personas (en público) se pesen vestidas, los valores registrados con estas balanzas tendrán un error sistemático por el peso de la vestimenta. La única manera de detectarlos y corregirlos es comparar las mediciones con otros métodos alternativos y realizar un análisis crítico y cuidadoso del procedimiento empleado. También es aconsejable intercalar en el proceso de medición patrones confiables que permitan calibrar el instrumento durante la medición.

**Errores estadísticos:** Son los que se producen al azar. En general son debidos a causas múltiples y fortuitas. Ocurren cuando, por ejemplo, nos equivocamos en contar el número de divisiones de una regla, o si estamos mal ubicados frente al fiel de una balanza. Estos errores pueden cometerse con igual probabilidad por defecto como por exceso. Por tanto, midiendo varias veces y promediando el resultado, es posible reducirlos considerablemente. Es a este tipo de errores a los que comúnmente hace referencia la teoría estadística de errores de medición. A estos errores se designaran como  $\sigma_{est}$ .

**Errores ilegítimos o espurios:** Se desea calcular el volumen de un objeto esférico y para ello se determina su diámetro. Si al introducir el valor del diámetro en la fórmula, se introduce mal el número, o se hace usando unidades incorrectas, o se usa una expresión equivocada del volumen, claramente se habrá cometido un error. Esta vez este error está más asociado al concepto convencional de equivocación. A este tipo de errores se designan como ilegítimos o espurios. A este tipo de errores no se aplica la teoría estadística de errores y el modo de evitarlo consiste en una evaluación cuidadosa de los procedimientos realizados en la medición. Un ejemplo de este tipo de error es el que se cometió en el Mars Climate Explorer a fines de 1999, al pasar de pulgadas a cm se cometió un error que costó el fracaso de dicha misión a Marte.

Cuando se desea combinar los errores sistemáticos con los estadísticos, la prescripción usual es sumar los cuadrados de los errores absolutos y luego tomar la raíz cuadrada de

este resultado, como lo indica la  $\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2}$

Ec. 2:3. Si se está midiendo una magnitud Z, el error final o combinado o efectivo de Z,  $\Delta Z$ , vendrá dado por:

$$\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2} \quad \text{Ec. 2:3}$$

Los errores pueden asimismo expresarse de distintos modos, a saber:

**Error absoluto:** es el valor de la incertidumbre combinada  $\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2}$  Ec. 2:3. Tiene las mismas dimensiones que la magnitud medida y es conveniente expresarla con las mismas unidades de ésta. Si  $Z$  es la magnitud en estudio,  $\bar{Z}$  es el mejor valor obtenido y  $\Delta Z$  su incertidumbre absoluta. El resultado se expresa adecuadamente como:

$$Z = \bar{Z} \pm \Delta Z \quad \text{Ec. 2:4}$$

El significado de esta notación es equivalente a decir que, según la medición, con una cierta probabilidad razonable  $p_0$  (usualmente  $p_0 = 0.68$ , 68%) el valor de  $Z$  está contenido en el intervalo  $(\bar{Z} - \Delta Z, \bar{Z} + \Delta Z)$ , o sea:

$$\bar{Z} - \Delta Z < Z < \bar{Z} + \Delta Z \quad \text{Ec. 2:5}$$

Lo que es equivalente a:

$$P(\bar{Z} - \Delta Z < Z < \bar{Z} + \Delta Z) = p_0 \quad \text{Ec. 2:6}$$

Que significa que la probabilidad de que el mejor estimador de  $Z$  esté comprendido entre  $\bar{Z} - \Delta Z$  y  $\bar{Z} + \Delta Z$  es igual a  $p_0$ . El valor de  $p_0$  se conoce con el nombre de coeficiente de confianza y los valores  $(\bar{Z} - \Delta Z, \bar{Z} + \Delta Z)$  determinan un intervalo de confianza para  $Z$ .

**Error relativo:**  $\varepsilon_Z = \frac{\Delta Z}{\bar{Z}}$ , el cociente entre el error absoluto y el mejor valor de la magnitud.

**Error relativo porcentual:**  $\varepsilon_Z, \% = 100 * \varepsilon_Z$ , es la incertidumbre relativa multiplicada por 100.

### 2.4.3 Cifras significativas

Cuando se realiza una medición con una regla graduada en milímetros, está claro que, si se es cuidadoso, se podrá asegurar un resultado hasta la cifra de los milímetros o, en el mejor de los casos, con una fracción del milímetro, pero no más. De este modo el resultado podría ser  $L = (95.2 \pm 0.5)$  mm, o bien  $L = (95 \pm 1)$  mm. En el primer caso se dice que la medición tiene tres cifras significativas y en el segundo caso sólo dos. El número de cifras significativas es igual al número de dígitos contenidos en el resultado de la medición que están a la izquierda del primer dígito afectado por el error, incluyendo este dígito. El primer dígito, o sea el que está más a la izquierda, es el más significativo (9 en este caso) y el último (más a la derecha) el menos significativo, ya que es en el que se tiene “menos seguridad”. Nótese que carece de sentido incluir en el resultado de  $L$  más cifras que aquellas en donde se tiene incertidumbre (donde “cae” el error).

No es correcto expresar el resultado como  $L = (95.321 \pm 1)$  mm, ya que si tenemos incertidumbre del orden de 1 mm, mal se puede asegurar el valor de las décimas, centésimas y milésimas del milímetro. Si el valor de  $L$  proviene de un promedio y el error es del orden del milímetro, se debe redondear el dígito donde primero cae el error.

Es usual expresar las incertidumbres con una sola cifra significativa, y solo en casos excepcionales y cuando existe fundamento para ello, se pueden usar más. También es usual considerar que la incertidumbre en un resultado de medición afecta a la última cifra si es que no se la indica explícitamente. Por ejemplo, si sólo se dispone de la información que una longitud es  $L = 95$  mm, se puede suponer que la incertidumbre es del orden del milímetro y, como se dijo antes, el resultado de  $L$  tiene dos cifras significativas.

Una posible fuente de ambigüedad se presenta con el número de cifras significativas cuando se hace un cambio de unidades. Si en el último ejemplo deseamos expresar  $L$  en  $\mu\text{m}$ , el resultado sería  $L = (95000 \pm 1000)$   $\mu\text{m}$ . ¿Cuántas cifras significativas tiene este resultado? Claramente dos, igual que antes, ya que la última cifra significativa sigue siendo 5. Sin embargo, si no se indica explícitamente la incertidumbre de  $L$ , es difícil saber cuántas cifras significativas se tienen. Nótese que  $95 \text{ mm} \neq 95000 \mu\text{m}$ , ya que el primer resultado tiene sólo dos cifras significativas mientras el segundo tiene 5. Para evitar estas ambigüedades se emplea la notación científica. Podemos escribir la siguiente igualdad:  $9.5 \times 10^1 \text{ mm} = 9.5 \times 10^4 \mu\text{m}$ . Nótese que los números en ambos miembros de la

igualdad tienen igual número de cifras significativas, siendo la única diferencia las unidades usadas.

#### 2.4.4 Histogramas y distribución estadística

Considere una población de personas de una ciudad y se quiere analizar cómo se distribuyen las estaturas de la población. Para llevar adelante este estudio se puede medir la altura de todos los individuos de la población, o bien tomar una muestra representativa de la misma, a partir de la cual se infieren las características de la población. Esta clase de estudio es un típico problema de estadística. Si se toma una muestra de tamaño  $N$  y para la misma se miden las alturas de cada individuo, este experimento dará  $N$  resultados:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ . Todos estos datos estarán comprendidos en un intervalo de alturas  $(x_{\min}, x_{\max})$  entre la menor y mayor altura medidas. Una manera útil de visualizar las características de este conjunto de datos consiste en dividir el intervalo  $(x_{\min}, x_{\max})$  en  $m$  subintervalos iguales, delimitados por los puntos  $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m)$  que determina lo que se llamará el rango de clases. Seguidamente, se cuenta el número  $n_1$  de individuos de la muestra cuyas alturas están en el primer intervalo  $[y_1, y_2)$ , el número  $n_j$  de los individuos de la muestra que están en el  $j$ -ésimo intervalo  $[y_{j-1}, y_j)$ , etc., hasta el subintervalo  $m$ . Aquí se ha usado la notación usual de usar corchetes, [...], para indicar un intervalo cerrado (incluye al extremo) y paréntesis comunes, (...), para denotar un intervalo abierto (excluye el extremo). Con estos valores definimos la función de distribución  $f_j$  que se define para cada subintervalos  $j$  como:

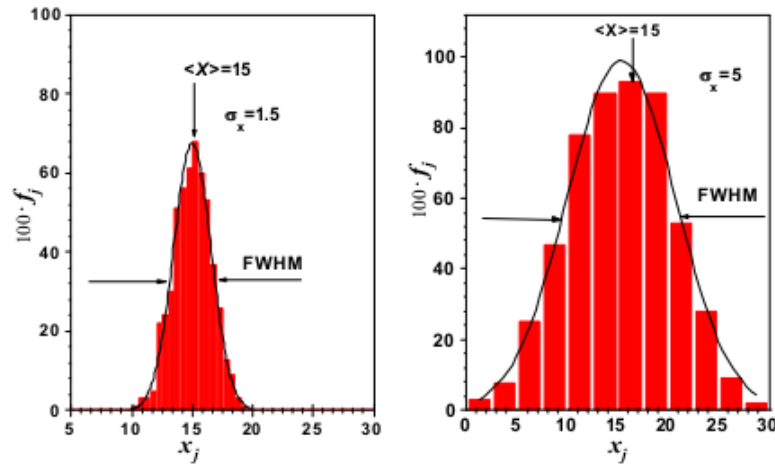
$$f_j = \frac{n_j}{\sum_j n_j}$$

Esta función de distribución está normalizada, es decir:

$$\sum_{j=1}^m f_j = 1$$

El gráfico de  $f_j$  versus  $x_j$  [ $x_j = 0.5 (y_{j-1} + y_j)$ ] nos da una clara idea de cómo se distribuyen las altura de los individuos de la muestra en estudio. Este tipo de gráfico se llama un histograma. En la Ilustración 2-3 se muestran dos histogramas típicos.

### Ilustración 2-3 – Distribución Gaussiana o Normal



NOTA: Histograma de dos muestras con igual valor medio pero con distintos grados de dispersión. En este ejemplo, los datos tienen una distribución Gaussiana o Normal, descrita por la curva de trazo continuo.

Tres parámetros importantes de una distribución son:

- El valor medio  $\bar{x} = \langle x \rangle = \sum_{j=1}^m x_j * f_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$
- La varianza:  $Var(x) = \sigma_x^2 = \sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2 * f_j$
- La desviación estándar:  $\sigma_x = \sqrt{Var(x)}$

El valor medio da una idea de la localización o valor medio de los valores en la muestra. En general  $\langle x \rangle$  da el centro de masa (centroide) de la distribución. Tanto  $Var(x)$  como  $\sigma_x$  dan una idea de la dispersión de los datos alrededor del promedio. Cuando más concentrada esté la distribución alrededor de  $\langle x \rangle$  menor será  $\sigma_x$  y viceversa.

Una distribución de probabilidad muy común en diversos campos es la distribución gaussiana o normal, que tiene la forma de una campana como se ilustra en trazo continuo en la Ilustración 2-3. La expresión matemática de esta distribución es:

$$f(x) = N(x; m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{Ec. 2:7}$$

La “campana de Gauss” está centrada en  $m$  y su ancho está determinado por la desviación estándar  $\sigma$ . En particular, los puntos de inflexión de la curva están en  $x - \sigma$  y  $x + \sigma$ . El área de esta curva entre estos dos puntos constituye el 68.3% del área total. El área entre  $x - 2\sigma$  y  $x + 2\sigma$  es del 96% del total. Es útil caracterizar para esta función el

ancho a mitad de su altura, que está relacionado con  $\sigma$  a través de la expresión:  $FWHM = 2.35\sigma$  (FWHM, de “full width half maximum”). Aunque esta distribución ocurre naturalmente en muchos procesos, desde luego no es única y existen muchos tipos de distribuciones de ocurrencia común en la naturaleza.

#### Error de una magnitud que se mide una única vez

En este caso el mejor valor será simplemente el valor medido y el error vendrá dado por el error nominal ( $\sigma_{nom}$ ) del instrumento. Según se deduce de  $\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} =$

$$\sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2} \quad \text{Ec. 2:3, } \Delta Z = \sigma_{nom}.$$

#### Error de una magnitud que se mide directamente N veces

Un modo de minimizar la incidencia de los errores estadísticos, es realizar varias mediciones del mesurando. Dado el carácter al azar de este tipo de errores es claro que, al promediar los resultados, el promedio estará menos afectado de las desviaciones estadísticas que los valores individuales. El procedimiento que se describe a continuación es un método para determinar el número óptimo de mediciones a realizar en cada caso y el modo de determinar las incertidumbres asociadas al promedio. Esta teoría no es aplicable para reducir los errores de carácter sistemático o espurios.

Suponiendo que se han hecho N mediciones de una misma magnitud con resultados  $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N$ . Estas N determinaciones pueden ser consideradas una muestra de todas las posibles mediciones que se podrían realizar (población). Bajo condiciones muy generales puede demostrarse que el mejor estimador de la magnitud  $x$  viene dado por el promedio,  $\bar{x} \equiv \langle x \rangle$ , de los valores:

$$\langle x \rangle \equiv \bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N} \quad \text{Ec. 2:8}$$

Este resultado es llamado también el mejor valor o estimador de  $x$  o valor más probable del mesurando. Llamaremos a

$$\Delta x_j = x_j - \bar{x} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ec. 2:9}$$

la desviación de cada medición respecto de  $\bar{x}$ . También definimos la desviación estándar o error cuadrático medio de cada medición,  $S_x$ . Esta cantidad es equivalente al concepto de desviación estándar de la población, más específicamente  $S_x$  es un estimador de la

misma.  $S_x$  da una idea global acerca de la dispersión de los  $x_j$  alrededor del promedio  $\bar{x}$ . Si la distribución es ancha  $S_x$  será grande y si es afilada su valor será pequeño (Ver Ilustración 2-3). Este estimador muestral ( $S_x$ ) de la desviación estándar poblacional viene dado por:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1} \quad \text{Ec. 2:10}$$

$S_x$  tiene las mismas dimensiones físicas que  $\bar{x}$ , pudiéndose comparar directamente con ésta. La calidad del proceso de medición será mayor cuanto menor sea el cociente  $S_x/\bar{x}$ , que en general es una constante del proceso de medición y no disminuye al aumentar  $N$ .

Como se acabó de explicar,  $S_x$  representa el error “promedio” de cada medición. Otra manera de explicar el significado de  $S_x$  es pensar que, cuando se realiza una serie de mediciones, los resultados obtenidos presentarán una distribución estadística, cuya desviación estándar viene dada por  $S_x$ .

Si se supone ahora que se realizan varias series de mediciones de  $x$ , y para cada una de estas series se calcula el valor medio  $\bar{x}$ , es de esperar que estos valores tendrán una distribución (puesto que variarán entre sí) pero con una menor dispersión que las mediciones individuales. Se puede probar que a medida que el número  $N$  de mediciones aumenta, la distribución de  $x$  será normal con una desviación estándar dada por:

$$\sigma_{est} = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N(N-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad \text{Ec. 2:11}$$

$\sigma_x$  se llama el error estándar del promedio y es el estimador del error asociado a  $\bar{x}$ .

Como se sabe,  $S_x$  es la dispersión de cada medición y no depende de  $N$  sino de la calidad de las mediciones, mientras que  $\sigma_x$  sí depende de  $N$  y es menor cuanto más grande es  $N$ . Si, por ejemplo, se está midiendo una longitud con una regla graduada en milímetros, resulta claro que si aumentamos el número de mediciones podremos disminuir el error estadístico, pero nunca con este instrumento podremos dar con certeza cifras del orden de los micrones, por más que realicemos muchas mediciones. Al aumentar  $N$ ,  $\sigma_x$  ciertamente disminuye, pero, desde un punto de vista físico, el error en  $\bar{x}$  solo puede disminuir hasta hacerse igual o del orden de  $\sigma_{nom}$ . La  $\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} =$



$\sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2}$  Ec. 2:3 indica que no es razonable esforzarse en disminuir  $\sigma_x$  mucho más que  $\sigma_{nom}$ . El balance óptimo se logra cuando  $\sigma_x \approx \sigma_{nom}$ . Esto es un criterio para decidir cuál es el número óptimo de mediciones a realizar de un mesurando. Como se supone que  $S_x$  es constante con  $N$ , la idea es hacer un número pequeño de mediciones  $N_{prel}$ , digamos unas 5 a 10, luego calcular  $S_x$ , de donde se obtiene:

$$N_{op} \approx \left( \frac{S_x}{\sigma_{nom}} \right)^2 \quad \text{Ec. 2:12}$$

Que resulta de imponer la condición:  $\sigma_{est} \approx \sigma_{nom}$ . Si  $N_{op} > N_{prel}$ , se completan las mediciones para lograr  $N_{op}$  valores. Si  $N_{op} < N_{prel}$ , no se realizan más mediciones que las preliminares y se usan todas ellas. En todos los casos, según la  $\Delta Z = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2} = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2}$  Ec. 2:3, el error combinado o efectivo vendrá dado por:

$$\Delta x^2 = \sigma_{ef}^2 = \sigma_{nom}^2 + \sigma_x^2$$

Para la mayoría de los casos de interés práctico, si se mide 100 veces una magnitud  $x$ , aproximadamente 68 de ellas caerán en el intervalo  $(\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x)$ , 96 de ellas en el intervalo  $(\bar{x} - 2\sigma_x, \bar{x} + 2\sigma_x)$ , y 99 de ellas en el intervalo  $(\bar{x} - 3\sigma_x, \bar{x} + 3\sigma_x)$ . Estos resultados valen estrictamente para el caso en que los errores se distribuyan "normalmente", es decir, si el histograma formado con los resultados de las mediciones adopta la forma de una campana de Gauss.

### 2.4.5 Propagación de incertidumbres

Hay magnitudes que no se miden directamente, sino que se derivan de otras que sí son medidas en forma directa. Por ejemplo, para conocer el área de un rectángulo se miden las longitudes de sus lados, o para determinar el volumen de una esfera se tiene que medir el diámetro. La pregunta que se quiere responder es cómo los errores en las magnitudes que se miden directamente se propagan para obtener el error en la magnitud derivada. Si se supone que la magnitud  $V$ , es una función de los parámetros,  $x, y, z$ , etc., o sea:

$$V = V(x, y, z, \dots) \quad \text{Ec. 2:13}$$

y que  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , etc., sí se midieron directamente y que se conocen sus errores, a los que se designan en el modo usual como  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , etc. Entonces se puede demostrar que el error en  $V$  vendrá dado por:

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 * \Delta x^2 + \left(\frac{dV}{dy}\right)^2 * \Delta y^2 + \left(\frac{dV}{dz}\right)^2 * \Delta z^2 + \dots} \quad \text{Ec. 2:14}$$

En rigor las derivadas involucradas en esta ecuación son derivadas parciales respecto de las variables independientes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , etc. En el caso especial que la función  $V(x,y,z,..)$  sea factorizable como potencias de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , etc., la expresión anterior puede ponerse en un modo muy simple. Suponiendo que la función en cuestión sea:

$$V(x, y, z) = a * \frac{x^n * y^m}{z^l} \quad \text{Ec. 2:15}$$

Entonces:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{n^2 * \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + m^2 * \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + l^2 * \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 + \dots} \quad \text{Ec. 2:16}$$

Para cálculos preliminares, esta expresión puede aproximarse por:

$$\frac{\Delta V}{V} \approx n * \left|\frac{\Delta x}{x}\right| + m * \left|\frac{\Delta y}{y}\right| + l * \left|\frac{\Delta z}{z}\right| \quad \text{Ec. 2:17}$$

Esta última expresión para la propagación de los errores se conoce con el nombre de aproximación de primer orden, mientras que la expresión

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{n^2 * \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + m^2 * \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + l^2 * \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 + \dots} \quad \text{Ec. 2:16}$$

se la denomina usualmente aproximación de segundo orden.

Otro caso particular de interés es  $Z = x \pm y$ . Usando la

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{n^2 * \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + m^2 * \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + l^2 * \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 + \dots} \quad \text{Ec. 2:16}$$

$$(\Delta Z)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 \quad \text{Ec. 2:18}$$

El análisis de incertidumbre de primer orden es un procedimiento para calcular la variabilidad esperada en una variable dependiente calculada como una función de una o más variables independientes. Supóngase que  $w$  se expresa como una función de  $x$ :

$$w = f(x) \quad \text{Ec. 2:19}$$

Existen dos fuentes de error en  $w$ : primero, la función  $f$ , o modelo, puede ser incorrecta; segundo, la medida de  $x$  puede ser inexacta. En el siguiente análisis se supone que no existe error de modelo, o sesgo. Kapur y Lamberson (1977) demostraron como puede extenderse el análisis cuando existe error de modelo. Entonces, suponiendo que  $f(\cdot)$  es un modelo correcto, se selecciona un valor nominal de  $x$ , denotado por  $\bar{x}$ , como una entrada de diseño y se calcula el valor correspondiente de  $w$ :

$$\bar{w} = f(\bar{x}) \quad \text{Ec. 2:20}$$

Si el valor real de  $x$  es diferente de  $\bar{x}$ , el efecto de esta discrepancia de  $w$  se estima expandiendo  $f(x)$  en una serie de Taylor alrededor de  $x = \bar{x}$

$$w = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(x - \bar{x}) + \frac{1}{2!} \frac{d^2}{dx^2}(x - \bar{x})^2 + \dots \quad \text{Ec. 2:21}$$

Donde las derivadas  $\frac{df}{dx}$ ,  $\frac{d^2}{dx^2}$ , ..., se evalúan en  $x = \bar{x}$ . Si se desprecian los términos de orden segundo o superior, la expresión de primer orden resultante para el error en  $w$  es:

$$w - \bar{w} = \frac{df}{dx}(x - \bar{x}) \quad \text{Ec. 2:22}$$

La varianza de este error es  $S_w^2 = E[(w - \bar{w})^2]$  donde  $E$  es el operador de esperanza, es decir,

$$S_w^2 = E \left\{ \left[ \frac{df}{dx}(x - \bar{x}) \right]^2 \right\} \quad \text{Ec. 2:23}$$

o

$$S_w^2 = \left( \frac{df}{dx} \right)^2 S_x^2 \quad \text{Ec. 2:24}$$

Donde  $S_x^2$  es la varianza de  $x$ .

La ecuación anterior permite el cálculo de la varianza de una variable dependiente  $w$  como una función de la varianza de una variable independiente  $x$ , suponiendo que la relación funcional  $w = f(x)$  es correcta. El valor  $S_w$  es el error de estimación estándar de  $w$ .

Si  $w$  es dependiente de varias variables mutuamente independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , puede demostrarse, utilizando un procedimiento similar al anterior, que

$$S_w^2 = \left(\frac{df}{dx_1}\right)^2 S_{x_1}^2 + \left(\frac{df}{dx_2}\right)^2 S_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_n}\right)^2 S_{x_n}^2 \quad \text{Ec. 2:25}$$

## 2.5 Equipos de medición

Un medidor de agua o caudalímetro es un instrumento de medida para el cálculo de caudal o gasto volumétrico de un fluido. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetros. Estos dispositivos se utilizan como herramientas para que las Empresas prestadoras del servicio de agua puedan medir el uso del agua de cada uno de sus clientes y pueden facturar apropiadamente a sus clientes por el agua utilizada, pero también hacen posible que esos clientes supervisen y controlen su uso tanto como deseen.

Los medidores de agua son a su vez definidos como instrumentos destinados a medir, memorizar y poner en el visor en forma continuada el volumen de agua que pasa a través del transductor de medición en condiciones de ser medido.

### 2.5.1 Características

#### Elementos constitutivos

**Transductor de medición:** Parte del medidor que transforma el flujo o el volumen del agua en señales que son transferidas al calculador. Puede estar basado en principios mecánicos, eléctricos o electrónicos. Puede ser autónomo o alimentado por una fuente eléctrica exterior.

**Sensor de flujo o sensor de volumen:** La parte del medidor de agua que capta el volumen del agua que pasa a través del medidor. El principio de funcionamiento del sensor puede ser para detección de flujo volumétrico o másico, aunque la indicación debe ser siempre volumétrica.

**Calculador:** La parte del medidor que recibe las señales de salida del transductor(es) y de instrumentos asociados de medición, los transforma y, si corresponde, archiva los resultados en la memoria hasta que sean usados. Además el calculador puede tener la capacidad de comunicarse en ambos sentidos con dispositivos auxiliares.

**Dispositivo indicador:** Parte del medidor que muestra los resultados de la medición en forma continuada o a solicitud.

**Dispositivo de ajuste:** Dispositivo incorporado en el medidor que permite corregir la curva de error de modo que se mantenga paralela a sí misma con el objeto de limitar los errores de indicación dentro del máximo tolerado de errores.

**Dispositivo de corrección:** Dispositivo conectado o incorporado al medidor para corregir automáticamente el volumen en condiciones de medición, al tomar en cuenta la velocidad del flujo y las características del agua a medir (por ejemplo, temperatura y presión) y las curvas de calibración previamente establecidas. Las características del agua pueden ser medidas mediante el uso de instrumentos medidores asociados, o ser archivadas en la memoria del instrumento.

#### Características metrológicas

**Volumen real  $V_a$ :** Volumen total de agua que pasa a través del medidor de agua, sin tener en cuenta el tiempo que toma. Este es el mensurado.

**Volumen indicado  $V_i$ :** Para un volumen real dado,  $V_i$  será el volumen indicado por el medidor.

**Indicación primaria:** Indicación (exhibida, impresa o en memoria) que está sujeta a control legal metrológico.

**Exactitud de la medición:** Grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la magnitud medida. Se mide en términos de error.

**Precisión:** Límite del error cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de operación. El valor de la precisión debe incluir los efectos combinados de linealidad, histéresis, banda muerta y repetibilidad. Se puede expresar como porcentaje de lectura efectuada.

**Rangeabilidad:** Relación entre el límite superior e inferior de la capacidad de medida de un instrumento. Se expresa con referencia al número de veces que cabe el valor del límite inferior entre el valor del límite superior.

**Rango específico de trabajo:** Es la diferencia entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

**Rango nominal:** Es el conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites inferior y superior de medida o transmisión del instrumento; se expresa en los dos valores extremos.

**Repetibilidad:** Capacidad que tiene un instrumento para obtener una medida en condiciones similares con la misma precisión y exactitud. Se expresa como porcentaje máximo de desviación entre diferentes mediciones de una misma variable en igualdad de condiciones.

**Resolución:** Expresión cuantitativa de la habilidad de un instrumento para distinguir entre valores cercanos adyacentes de la cantidad o magnitud indicada.

**Tiempo de autonomía:** La autonomía es el tiempo que un dispositivo con una fuente de alimentación independiente puede permanecer activo, hasta el agotamiento de la fuente de alimentación. Para el caso de la instalación de medidores de agua se debe tener un tiempo de autonomía mínima.

**Vida útil de servicio:** Es el tiempo mínimo especificado durante el cual un instrumento funciona de manera continua o intermitente sin que presenten alternaciones en la

medición que vayan más allá de las tolerancias especificadas.

**Linealidad:** Aproximación de una curva de calibración a una línea recta teórica especificada medida con la metodología de mínimos cuadrados.

**Error absoluto:** Diferencia entre el valor medido y el valor real de la magnitud medida.

**Error relativo:** Error de indicación dividido por el volumen real.

**Durabilidad:** Capacidad del medidor de agua de mantener sus características metrologías durante el período de su vida útil.

**Condiciones de medición:** Condiciones del agua cuyo volumen ha de ser medido en el punto de medición, por ejemplo: temperatura y presión.

**Primer elemento de un dispositivo indicador:** Elemento que, en un dispositivo indicador que comprende varios elementos, posee la escala graduada con el intervalo de verificación.

**Intervalo de verificación de escala:** División de escala del valor más bajo del primer elemento de un dispositivo indicador.

**Resolución de un dispositivo indicador:** La diferencia más pequeña entre las indicaciones de un dispositivo indicador que puedan ser significativamente distinguidas. Para un dispositivo digital, esto significa el cambio en la indicación cuando el dígito menos significativo cambia en un paso.

#### Condiciones de funcionamiento

**Régimen de caudal, Q:** Cociente del volumen real del agua que pasa a través del medidor y el tiempo empleado para que este volumen pase a través del mismo.

**Temperatura máxima admisible:** Temperatura máxima del agua que puede soportar el medidor en forma permanente, dentro de las condiciones de operación, sin deteriorarse y manteniendo sus características metrológicas.

**Presión máxima admisible:** Presión máxima interna que puede soportar el medidor en forma permanente, dentro de las condiciones de operación, sin deteriorarse y manteniendo sus características metrológicas.

### Condiciones de instalación

El punto de medición debe cumplir con lo siguiente:

- El medidor deberá instalarse de modo tal que esté completamente lleno de agua, en condiciones normales de operación.
- Previamente debe confirmarse el tipo de flujo existente, a presión o flujo libre, para definir el equipo a utilizar.
- Si es posible que la exactitud del medidor se vea afectada por perturbaciones en la tubería, aguas arriba o aguas abajo, debido a la presencia de codos, válvulas o bombas, se establecerá una longitud recta aguas arriba y aguas abajo que cumpla con las especificaciones definidas por los fabricantes de los equipos de medición.
- Que la velocidad del agua en el punto de medición sea superior a la mínima admisible. Es óptima si es superior a 0.3 m/s.
- Si es posible que la exactitud del medidor se vea afectada por la presencia de partículas sólidas en el agua, por ejemplo en el caso de turbinas o en el de medidores de desplazamiento positivo, deberá instalarse un filtro colocado en su entrada o en la tubería, aguas arriba del medidor.
- Se deben tomar precauciones para que el medidor esté correctamente orientado y nivelado en la tubería, de acuerdo a su principio de funcionamiento, tecnología y recomendaciones del fabricante.
- Revisar los niveles óptimos requeridos para una medición de precisión.

## **2.5.2 Tipos de Medidor**

Los tipos de medidores más comunes son los medidores de flujo de presión diferencial, de desplazamiento positivo, de velocidad, de masa y de canal abierto. Cada uno tiene diferentes versiones que operan bajo el mismo concepto. Placas de orificio, tubos de venturi y de flujo son todos ejemplos de medidores de flujo de presión diferencial.



Pistones alternativos y paletas rotativas son ejemplos de medidores de desplazamiento positivo. Las turbinas y medidores doppler son tipos de medidores de velocidad. Los medidores tipo coriolis y termales son medidores de masa.

Los medidores de flujo más utilizados son los de presión diferencial. Los medidores de desplazamiento positivos son ideales para aplicaciones que incluyen la dosificación automática y contabilidad. Los medidores de flujo de masa se usaron por primera vez cuando se necesitaban medidas más precisas de procesos relacionados con la masa.

**Desplazamiento positivo:** El medidor de desplazamiento positivo mide el flujo de agua con un volumen de líquido medido previamente, que está en una recámara pequeña. El principio de medida se basa en el empleo de una cámara de forma cilíndrica con un elemento móvil dentro de ella, el cual, al pasar el agua adquiere un movimiento periódico que ocasiona la llenada y vaciada de la cámara, continuamente. El flujo de agua sigue el mismo sentido en que sucede el movimiento del elemento móvil, o se tiene un desplazamiento positivo. El caudal se calcula con el número de veces que se llena esta cámara y se vacía. Los datos se registran a través de un disco oscilante o un mecanismo de pistón. Los medidores de desplazamiento positivo son ideales para la medición de flujo bajo, lo que significa que es el que se encuentra en la mayoría de las casas, apartamentos, hoteles y edificios de oficinas.

**Medidor de velocidad:** Los medidores de velocidad registran la velocidad del flujo y que se traduce como volumen de flujo del agua. Estos dispositivos utilizan diferentes mecanismos para medir la velocidad y luego traducen los datos recibidos a volumen. Funcionan bajo el principio inferencial que consiste en deducir o inferir el volumen de agua que pasa por el tubo en que está instalado el medidor, del número de revoluciones que da un rotor o turbina accionado por el flujo del agua. Para un determinado orificio y un determinado rotor, el número de revoluciones producido durante cierto tiempo es proporcional a la velocidad del paso del agua a través de la sección.

Los medidores de velocidad están constituidos fundamentalmente por una cámara, un rotor y un orificio (simple o múltiple) que admite el agua. De acuerdo con la forma como actúa el flujo y la disposición de su entrada, resultan varios tipos de medidores: de turbina tipo Woltman, Venturi, de orificio, ultrasónicos, magnéticos, de hélice, de chorro

único y de chorro múltiple. Este tipo de medidor es ideal para medir flujo alto. Este mecanismo se utiliza en las empresas que utilizan grandes flujos de agua como parte de su proceso de fabricación diaria.

**Medidores mecánicos:** Son aquellos dispositivos de medida que son accionados directamente por el empuje hidrodinámico (energía de presión o energía de velocidad) del agua.

**Medidor Woltmann:** Dispositivo mecánico que cuenta con una cuchilla o hélice helicoidal, la cual gira alrededor de la línea central en el conducto o paso de agua (sección circular) en el medidor. Está clasificado como medidor de velocidad.

**Medidores combinados:** En estos medidores la unidad está constituida por dos medidores con capacidad nominal diferente, rangos de medida que se traslapan y una válvula de conmutación que accionada por el agua, regula automáticamente la distribución del gasto entre los dos medidores. Pueden estar conectados en serie o en paralelo y se emplean en aquellos casos en que el consumo tiene un amplio rango de variación.

**Medidores proporcionales:** Este tipo de aparato se diseña para medir grandes gastos de agua con pérdida de carga mínima. La medida del gasto se hace en un medidor pequeño en paralelo en la línea aforada, calibrada en tal forma que registra el consumo total en proporción al agua derivada. Generalmente adoptan la forma combinada, es decir, tienen un medidor para gastos pequeños y una válvula diseñada de tal modo que con los grandes gastos funcione el medidor proporcional. Se emplean en conducciones destinadas a protección contra incendio, las cuales requieren un flujo con baja pérdida de presión.

**Medidores de presión diferencial:** Son aquellos medidos en los que el dispositivo de medida se compone de un elemento estrangulador de la vena líquida (placa de orificio, tobera, tubo tipo venturi) que ocasiona una pérdida de carga. El principio de medida se basa en la proporcionalidad entre el gasto y la raíz cuadrada de la pérdida de carga. Debido a su alta precisión, se emplean tanto en la medida de suministros globales a un

sistema de acueducto, como en la calibración de los medidores de efecto doppler, electromagnéticos y por ultrasonido.

TIPO DE MEDIDOR	CARACTERISTICAS
<p>Medidor Volumétrico o de desplazamiento positivo</p> <p>Medidores de accionamiento mecánico</p>	<p>Económico</p> <p>No requiere de fuentes de alimentación externa para su funcionamiento</p> <p>No afectable por condiciones de humedad e inundación</p> <p>Alta sensibilidad a caudales bajos</p> <p>Instalación vertical u horizontal</p> <p>Se encuentran partes móviles en contacto con el fluido</p> <p>Pérdidas de presión (0.6 Bar)</p> <p>Sensibilidad al bloqueo</p> <p>Mantenimiento según funcionamiento</p> <p>No es típicamente empleado en diámetros grandes</p> <p>El medidor puede ser dañado por la aparición de bolsas de aire</p> <p>Precisión: 2% a 5% según caudal de funcionamiento</p>
<p>Medidores De Velocidad: Contacto Tangencial Con el Rotor de Turbina</p>	<p>Versátil para medición en condiciones donde el fluido puede presentar suspensiones.</p> <p>Se encuentran solo una parte móvil en contacto con el fluido</p> <p>Dependiendo de su clase aumenta el error a caudales bajos</p> <p>Con el tiempo puede presentar sobre-registro</p> <p>Clase Metrología C.</p> <p>Requiere mantenimiento o cambio según características de consumo</p> <p>Precisión: 2% a 5% según caudal de funcionamiento</p>
<p>Medidores De Hélice Tipo Woltman</p>	<p>Económico</p> <p>Empleado en diámetros grandes, Clase B</p> <p>No requiere fuentes de alimentación externa.</p> <p>No se afecta por condiciones de humedad e inundación</p> <p>Desgaste de las piezas, especialmente en los cojinetes de apoyo del medidor.</p> <p>Daño por bolsas de aire</p> <p>Mantenimiento para verificación de condiciones metrológicas, recalibraciones y/o reparaciones.</p> <p>Empleados en aguas poco tratadas.</p> <p>Precisión: 2% a 5% según caudal de funcionamiento</p>
<p>Coriolis</p>	<p>Elevada exactitud y repetibilidad</p> <p>No cuenta con piezas móviles. No desgaste</p> <p>No necesita espacio.</p> <p>No se ve afectado por la presencia de bolsas de aire.</p> <p>Insensible a las distorsiones en el perfil de flujo.</p> <p>Disminuye los costos del sistema al no presentar pérdida de presión.</p> <p>No tiene requerimientos de espacios rectos.</p> <p>Exactitud de la medición +/- 0.3%</p> <p>Las propiedades del fluido no inciden en la medición.</p>

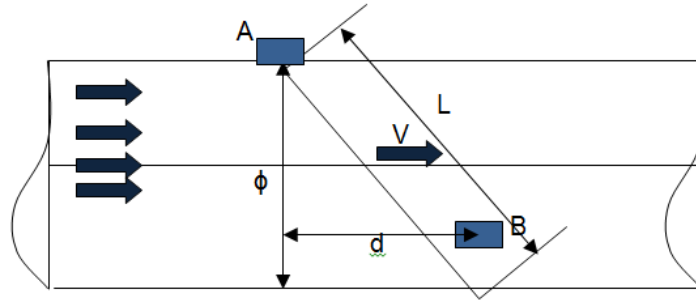
Los medidores más utilizados en la industria del agua y en la medición de grandes caudales son los ultrasónicos principalmente, y electromagnéticos. El detalle de su funcionamiento y características principales se describe a continuación:

### Medidor de Caudal Ultrasónico

Los medidores de velocidad ultrasónicos transmiten ondas de sonido a través del agua fluyendo dentro de un tubo. A medida que el sonido viaja a través del agua, altera la velocidad donde un lector registra cambios en el flujo y luego lo compara con una referencia para obtener una lectura apropiada. Los equipos de medición ultrasónicos emplean como técnicas de medición, el tiempo de tránsito o el cambio de frecuencia.

Su principio operativo está basado sobre la modificación del tiempo de tránsito que sufre una señal de ultrasonido por la velocidad del flujo. El equipo mide la diferencia de tiempo de tránsito (DT) entre una onda proveniente del sensor A dirigiéndose a B y una onda proveniente de B dirigiéndose a A, como se muestra a continuación:

**Ilustración 2-4 – Vista longitudinal tubería Medidores Ultrasónicos**



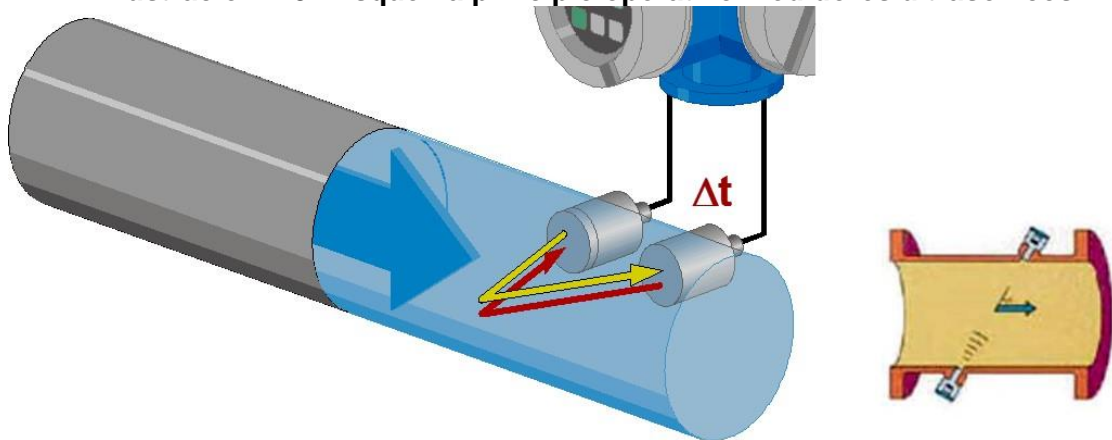
Con esta medición se puede calcular el caudal Q de la forma siguiente:

$$Q = \frac{\pi \phi^2}{4} \times \frac{1}{Kh} \times \frac{L^2}{2d} \times \frac{\Delta T}{T^2} \quad \text{Ec. 2:26}$$

En la cual:

- Ø: Diámetro interior de la tubería
- L: Distancia entre sondas
- d: Distancia entre los planos de las sondas
- T: Tiempo transitorio promedio de la señal entre las sondas A y B
- ΔT: Diferencia entre el tiempo de tránsito de A a B y de B a A.
- Kh: Coeficiente hidráulico.

**Ilustración 2-5 –Esquema principio operativo medidores ultrasónicos**



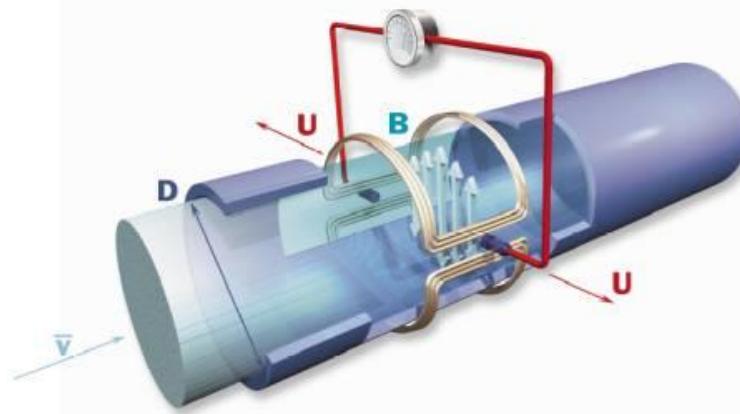
Medición Electromagnética

Los medidores magnéticos usan un tubo aislado para el flujo de agua. A medida que el agua viaja a través del tubo, el flujo crea una ligera corriente eléctrica que se puede medir contra la velocidad del agua para determinar y registrar el flujo.

El principio operativo de medición de este dispositivo se basa en la ley de Faraday que anuncia: una carga eléctrica q de ancho L desplazándose a la velocidad U perpendicularmente a un campo magnético B crea una diferencia de potencial inducida según la fórmula:

$$U = B \times L \times U \quad \text{Ec. 2:27}$$

**Ilustración 2-6 – Esquema principio operativo medidores electromagnéticos**



Aplicado a un caudal de un fluido conductor en una tubería en carga se crea un campo electromagnético dentro del fluido con la varilla y se puede deducir que el líquido conductor, desplazándose en el campo electromagnético, producirá una diferencia de potencial que se podrá medir entre los dos electrodos de la varilla. Estos equipos pueden

ser instalados sobre todo tipo de tuberías, aunque necesitan la colocación de un registro de incorporación de 1". Permiten medir tuberías de 6" a 42".

Su tamaño de 900 mm a 1600 mm de longitud hace que en la mayoría de los casos, se necesite una tapa de acceso alineada con el registro de incorporación para poder insertarla en la cámara de medición y en la tubería.

Las principales características tanto de medidores ultrasónicos como electromagnéticos son:

**Tabla 2.4 – Comparación entre medidores ultrasónicos y electromagnéticos**

Medidores Ultrasónicos	Medidores Electromagnéticos
Medición en una gran gama de diámetros	Conducción llena, presión positiva, pendientes ascendentes, instalación vertical
No se necesita suspensión de servicio para su instalación	No requiere mantenimiento frecuente
Empleado para medir en condiciones agresivas	No se opone al medio
El valor de la inversión inicial puede ser elevado	Permite la medición de líquidos difíciles
Oposición al fluido: Ninguna, por lo tanto no se generan pérdidas de carga	No cuenta con piezas móviles
Es obligatoria la instalación de acometidas eléctricas (Alimentación de la red y Suplencia), adicionalmente se debe contar con la instalación a tierra.	Disminuye los costos del sistema al no presentar pérdida de presión
Puede ser empleado con sondas externas o intrusivas	Requisitos mínimos de espacio y de tuberías rectas
Errores en la señal cuando se presenta aire en la red	Amplio rango de medición
Medición en sólidos y líquidos incluyendo medición de flujo en canales abiertos	Exactitud de la medición +/- 0.5%
No se afecta por las variaciones de viscosidad y presión.	Dependiente de la conductividad del Fluido
Mantenimiento: Verificación de parámetros	Instalación a tierra.
Exactitud de la medición: +/-1% condiciones del fabricante, +/-2% condiciones instalación	Detección de Posibles Fugas
El perfil del flujo afecta notablemente la precisión de la medición.	
En el caso de tuberías constituidas de material homogéneo, tales como PVC, asbesto cemento, hierro fundido, acero, entre otros, pueden utilizarse equipos con sensores externos que no requieren perforación de la tubería.	
Para realizar una medición sobre tuberías conformadas por dos materiales, tales como tuberías de concreto con refuerzo de acero, se necesitará la	

instalación de sondas intrusivas con dos perforaciones en la tubería y la instalación de registros de incorporación. Las sondas estarán en este caso directamente en contacto con el agua.	
--	--

## 2.6 Indicadores

El establecimiento de un balance hídrico estandarizado proporciona a la empresa de agua cifras confiables respecto de la cantidad de pérdidas reales y aparentes en su sistema de suministro de agua. Los distintos indicadores de desempeño (ID) deben entonces calcularse y analizarse para determinar si estas pérdidas son comparativamente altas o bajas.

Sin embargo, los indicadores de desempeño no son solamente herramientas para las comparaciones nacionales o internacionales entre empresas de suministro de agua y nunca deben ser un fin en sí mismos: los indicadores de desempeño ayudan a extraer información necesaria de enormes cantidades de datos y son una herramienta útil para los procesos de toma de decisiones. Como primer paso, es importante definir objetivos precisos y claros y determinar las estrategias más convenientes para cumplirlas. Entonces se debe seleccionar indicadores de desempeño apropiados y se debe recolectar los datos de ingresos necesarios. [17]

En general, se reconoce la existencia de dos tipos de indicadores de pérdidas de agua: los indicadores financieros y los indicadores operacionales.

Los indicadores financieros son aquellos que reflejan principalmente los costos en los que incurre la empresa, o aquellos ingresos que deja de percibir por efecto de los volúmenes de agua perdida. Entre estos, los más conocidos son:

- IANC: Agua no facturada como un porcentaje del volumen de agua producido
- Costo anual de pérdidas comerciales o aparentes
- Costo anual de pérdidas técnicas o reales

Los indicadores operacionales son aquellos cuyo objetivo es medir la gestión operativa de los prestadores en el manejo de las pérdidas, por lo cual los parámetros usados para su construcción buscan cuantificar en volumen y no en costos el nivel de pérdidas de un sistema. Los indicadores de tipo operacional más comunes son:

- Volumen de Pérdidas por suscriptor por mes ( $m^3/\text{suscriptor}/\text{mes}$ )
- Volumen de Pérdidas Técnicas por conexión por día ( $m^3/\text{conexión}/\text{día}$ )
- Volumen de Pérdidas Comerciales por conexión por día ( $m^3/\text{conexión}/\text{día}$ )
- Volumen de Pérdidas Técnicas por suscriptor por día ( $m^3/\text{suscriptor}/\text{día}$ )
- Volumen de Pérdidas Comerciales por suscriptor por día ( $m^3/\text{suscriptor}/\text{día}$ )
- Volumen de Pérdidas Técnicas por kilómetro de red por día ( $m^3/\text{km}/\text{día}$ )
- Volumen de Pérdidas Técnicas por metro de presión por día ( $m^3/\text{m.c.a.}/\text{día}$ )

En la última década se han presentado desarrollos adicionales que buscan determinar índices que de alguna forma consideren tanto la parte financiera como la parte operacional de los sistemas. En ese sentido, los principales desarrollos se han efectuado en caso de la gestión de pérdidas técnicas, para lo cual algunos de los indicadores de mayor reconocimiento son:

- Pérdidas Técnicas Anuales Inevitables (UARL por sus siglas en inglés)
- Pérdidas Técnicas Económicamente Recuperables (ERRL)
- Índice de Fugas de Infraestructura (ILI por sus siglas en inglés)

En el caso de las pérdidas comerciales, en la actualidad los equipos de trabajo de la IWA y algunas asociaciones internacionales especializadas en el tema, tales como la AWWA (American Water Works Association) y el Energy and Water Department (EWD) of the World Bank se encuentran desarrollando investigaciones que permitan identificar los mejores indicadores de gestión de este tipo de pérdidas, sin que existan aún resultados definitivos.

La tendencia general que se reconoce a nivel nacional e internacional, es que se debe reevaluar el uso de indicadores porcentuales como el IANC, y se debe propender, en el corto plazo, por el uso de indicadores que reflejen el volumen de agua perdida, normalizado por parámetros como número de conexiones, número de suscriptores, longitud de red, etc., que permitan la comparación entre los diferentes sistemas de acueducto. En el mediano y largo plazo, se deberá estudiar la posibilidad de implementar regulatoriamente indicadores como el ILI, el cual ha sido probado en al menos 50 países y actualmente es reconocido como el mejor indicador de gestión de pérdidas técnicas.

A continuación la descripción de los principales indicadores mencionados:







**Tabla 2.5 – Indicadores de desempeño en sistemas de acueducto**

ID	DEFINICIÓN	CÁLCULO	OBSERVACIONES
<b>IANC</b>	<p>Índice de agua no contabilizada.</p> <p>Es un indicador porcentual y es el más utilizado por su sencillez en la aplicación.</p>	$IANC = \frac{Vp + Ca - Vf}{Vp + Ca} \times 100\%$ <p>Donde:</p> <p>Vp: Volumen de agua producido. Ca: Compra de agua Vf: Volumen de agua facturado</p>	<p>Es el más sencillo y común de emplear y es bueno si se quiere tener una visión general del problema.</p> <p>Depende mucho de variaciones del consumo, lo cual afecta su uso como indicador de desempeño y medición de metas.</p>
<b>ISUF</b>	<p>Índice de Agua Suministrada por Usuario Facturado</p> <p>Representa el volumen de agua por suscriptor que un prestador debe producir en planta con el fin de abastecerlo.</p>	$ISUF = \frac{AP_{ac}}{(N_{ac} * 12)}$ <p>Donde:</p> <p><b>ISUF</b>: Volumen de agua suministrado por suscriptor por mes (m<sup>3</sup>/susc./mes) <b>AP<sub>ac</sub></b>: Agua producida en el sistema de acueducto (medida a la salida de la planta) en el año base expresado en m<sup>3</sup>. <b>N<sub>ac</sub></b>: Número de suscriptores de acueducto en junio del año base.</p>	<p>Un nivel aceptable de suministro de agua ISUF debe estar asociado a un nivel de pérdidas que, de forma integral, esté en armonía con las políticas de reducción de consumo y uso racional del recurso, buscando, como principal objetivo, la disminución de producción de agua por parte de los prestadores.</p>
<b>ICUF</b>	<p>Índice de agua consumida por usuario facturado.</p> <p>Representa el volumen de agua facturado por suscriptor.</p>	$ICUF = \frac{AF_{ac}}{(N_{ac} * 12)}$ <p>Donde:</p> <p>ICUF: Volumen de agua facturado por suscriptor por mes (m<sup>3</sup>/susc./mes) <b>AF<sub>ac</sub></b>: Volumen de agua facturada en el año base en m<sup>3</sup> <b>N<sub>ac</sub></b>: Número de suscriptores de acueducto en junio del año base.</p>	<p>Un bajo nivel de consumo por usuario facturado ICUF puede ser indicativo de ineficiencias en la gestión de facturación.</p> <p>La facturación deficiente de unos usuarios eleva las tarifas de los demás, al distribuir los costos entre menos metros cúbicos facturados.</p>
<b>IPUF</b>	<p>Índice de pérdidas de agua por usuario facturado.</p> <p>Representa el volumen de agua perdida por suscriptor por mes.</p>	$IPUF = ISUF - ICUF$	<p>Considera de forma agregada las pérdidas, sin importar su distribución entre técnicas y comerciales, a partir de un volumen por suscriptor por mes. Además, este indicador incluye el volumen correspondiente a los consumos autorizados no facturados por parte de los prestadores.</p> <p>Un nivel aceptable de Índice de Pérdidas de Agua por Usuario Facturado IPUF refleja el potencial de gestión en control y reducción de pérdidas que tienen los prestadores del servicio.</p>

El Índice de Agua No Contabilizada (IANC) ha sido el indicador de pérdidas establecido en Colombia por la regulación, el cual se definió a partir de la expedición de la Resolución CRA 17 de 1995, incorporada en la Resolución CRA 151 de 2001, y se mantiene su aplicación a partir de las disposiciones contenidas en la Resolución CRA 287 de 2004 y la definición contenida en la Resolución CRA 315<sup>11</sup> de 2005, numeral 1.1 del Anexo 2.

La revisión bibliográfica internacional, basada principalmente en los estudios adelantados por la IWA, así como las experiencias de los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto en Colombia, muestran que la bondad y robustez del denominado Índice de Agua No Contabilizada (IANC), se ven afectadas significativamente por aspectos como variaciones en la demanda de agua, el volumen de agua exportado o importado al sistema y el volumen de agua facturado, ya que se dice que los indicadores porcentuales no son los mejores, pero pueden ser utilizados en la medida en que se dificulte la adopción de mejores indicadores por falta de información.

En la actualidad aún no existe un indicador operacional, que permita establecer metas de reducción, que sea lo suficientemente completo, robusto y probado. Los esfuerzos se están enfocando en la definición de mejores parámetros e indicadores de los niveles de pérdidas aparentes que reflejen de mejor forma la gestión de las empresas prestadoras y el establecimiento de metas de reducción de los niveles de pérdidas que sean reales y viables de alcanzar.

La mejor y más simple aproximación a las pérdidas reales son los indicadores de pérdidas por conexión o pérdidas por kilómetro de red, con algún criterio de presión media y preferiblemente con un cálculo ILI. Para el nivel de pérdidas comerciales, es posible que el desarrollo de metodologías sea de mayor complejidad respecto a las pérdidas reales.

#### ILI: Índice de Fugas de Infraestructura

Las investigaciones adelantadas a nivel mundial, respecto de las pérdidas técnicas se han enfocado en la definición de indicadores adecuados que midan la gestión de los prestadores y, a partir de esto, desarrollar métodos que faciliten la obtención de

resultados producto de la implementación de programas de gestión y reducción de pérdidas.

En 1999, la Fuerza de Tarea de Pérdidas de Agua (WLTF) de la Asociación Internacional del Agua (IWA)<sup>2</sup> hizo público un indicador de desempeño de pérdidas técnicas denominado Índice de Fugas en Infraestructura (ILI, por su nombre en inglés Infrastructure Leakage Index), el cual ha sido probado en al menos 50 países y actualmente es reconocido como el mejor indicador de gestión de pérdidas técnicas considerando que:

**Tabla 2.6 – Ventajas y desventajas Índice de fugas en infraestructura ILI**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Conceptualmente mejor que los índices porcentuales	No se considera apropiado que se establezca como un único indicador para definir metas.
Permite una buena comparación entre sistemas y definición de metas.	Debe ser usado en conjunto con la evaluación económica del costo de reducción de las pérdidas.
En el momento en que se decida no emplear indicadores de tipo porcentual, se considera al ILI como la mejor opción.	Su cálculo requiere de un esfuerzo considerable para obtener la información necesaria para su estimación.

El indicador *ILI*, de tipo adimensional, se encuentra definido como:

$$ILI = \frac{PRT}{PRI} \quad \text{Ec. 2:28}$$

Donde:

PRT: Pérdidas reales (técnicas) totales

PRI: Pérdidas reales (técnicas) inevitables

Los resultados de este cálculo oscilan entre 1 y hasta mayores de 16, donde un valor menor del índice significa que la gestión del prestador es adecuada, en la medida en que el valor de pérdidas totales técnicas se aproxime al valor reconocido de pérdidas técnicas

---

<sup>2</sup> La aproximación presentada corresponde específicamente a investigaciones desarrolladas por Roland Liemberger, investigador austriaco, con más de 20 años de experiencia en la industria del agua, especializado en detección de fugas, reducción de fugas y rehabilitación de redes. Continuamente ha trabajado en proyectos en países en vía de desarrollo, Europa Oriental y la antigua Unión Soviética, y en la actualidad posee una firma consultora especializada.

inevitables. Es decir, este indicador ya supone y reconoce que existe un nivel de pérdidas técnicas que es inevitable de reducir por parte del prestador.

Sin embargo, a pesar de la aparente simplicidad de la fórmula, la estimación de las variables *PRT* y *PRI*, requiere de un conocimiento avanzado del sistema de acueducto por parte del prestador. Por ejemplo, el IWA recomienda que la estimación del *PRT* se realice a partir del Balance Hídrico propuesto por el mismo Instituto.

Asimismo, para la estimación del *PRI* se han desarrollado algunas expresiones empíricas, de compleja aplicación y entendimiento, a partir de las cuales se han generado versiones simplificadas que, sin embargo, pueden no recoger todas las particularidades que presenta un sistema de acueducto.

Debido a la complejidad que puede generar el uso y cálculo de este indicador, la Fuerza de Tarea de Pérdidas de Agua (WLTF) presentó una metodología ante el Instituto del Banco Mundial (WBI) en el año 2005, en la cual buscaba simplificar el uso del *ILI* como indicador que permita a los prestadores facilitar su acción en reducción de pérdidas.

**Tabla 2.7 – Evaluación del sistema de acuerdo a ILI**

Categoría desempeño técnico		ILI	Pérdidas reales (m <sup>3</sup> /conexión/mes)				
			Presión promedio (m.c.a)				
			10	20	30	40	50
Países desarrollados	A	1-2		<1.5	<2.25	<3	<3.75
	B	2-4		1.5-3	2.25-4.5	3-6	3.75-7.5
	C	4-8		3-6	4.5-9	6-12	7.5-15
	D	>8		>6	>9	>12	>15
Países en desarrollo	A	1-4	<1.5	<3	<4.5	<6	<7.5
	B	4-8	1.5-3	3-6	4.5-9	6-12	7.5-15
	C	8-16	3-6	6-12	9-18	12-24	15-30
	D	>16	>6	>12	>18	>24	>30

A: Una reducción de pérdidas puede ser poco rentable a menos que haya escasez.

B: Siempre hay posibilidades de mejorar más.

C: Las fugas pueden ser tolerables sólo si hay recursos abundantes y baratos.

D: El uso ineficiente de los recursos es señal de la falta de mantenimiento y de las condiciones generales del sistema.

## 2.7 Normatividad

La Ley 142 de 1994 en su artículo 163 establece que las fórmulas tarifarias incluirán un nivel de pérdidas aceptable según la experiencia de otras empresas eficientes.

En virtud de lo anterior, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico expidió la Resolución CRA 17 de 1995, posteriormente incorporada en la Resolución CRA 151 de 2001, cuyo artículo 2.4.3.14 dispone que el nivel máximo de agua no contabilizada que se aceptará para el cálculo de los costos de prestación del servicio de acueducto será del 30%, por lo cual el valor del parámetro  $p^*$ , correspondiente al nivel de pérdidas aceptables, será como máximo igual a 0,30.

Asimismo, la Ley 373 de 1997 señala en su artículo 4°, que se deben fijar metas anuales para reducir pérdidas en cada sistema, mientras que en su artículo 8° establece que la Comisión de Regulación de Agua Potable definirá una estructura tarifaria que incentive el uso eficiente y de ahorro del agua, y desestime su uso irracional.

### Resolución CRA 287 de 2004

De esta manera, esta Comisión de Regulación expidió la Resolución CRA 287 de 2004 en cuyo Costo Medio de Operación particular de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado se introduce el parámetro  $p^*$  correspondiente al nivel máximo aceptable de pérdidas establecido en 30%. Igualmente, introduce en el cálculo del mencionado costo el Índice de Agua No Contabilizada (IANC) del operador y un factor de ajuste por excedente de pérdidas comerciales del prestador de 0,57. [18]

Lo anterior, por cuanto se trata de reconocer sólo las pérdidas técnicas del operador, teniendo en cuenta que el factor de 0,57 busca reconocer las pérdidas técnicas, más no las pérdidas comerciales que estén por encima del  $p^*$ . Este valor se obtiene a partir de datos reportados por las empresas por solicitud de la Comisión, en julio de 2003. Para su cálculo se promediaron los valores de una muestra de 30 empresas quienes reportaron su división de pérdidas en técnicas y comerciales.

En este mismo sentido, la mencionada resolución dispone que, en relación con el Costo Medio de Inversión, para la determinación del Valor Presente del Plan de Inversiones en

Reposición, Expansión y Rehabilitación (VPIRER), los prestadores deben tener en cuenta que su proyección de inversiones debe estar sujeta a sus metas de reducción de pérdidas, entre otros aspectos, y que tales inversiones solamente podrán incluirse en los casos en que estén dirigidas a la reducción de pérdidas técnicas. Con esto se buscó evitar inversiones injustificadas, ya que una parte importante de las pérdidas de agua puede disminuirse por la gestión comercial del operador.

Igualmente, establece que para calcular el Valor Presente de la Demanda (VPD) se debe tener en cuenta el parámetro  $p^*$  así como el IANC del operador en cada año de proyección de demanda. Así las cosas, se buscaba proyectar la demanda a partir de la cual se recuperaría la inversión planeada. Esta demanda incluye dentro de su cálculo el parámetro  $p^*$ , cuyo objetivo es limitar desde el punto de vista regulatorio, las pérdidas de agua que finalmente serían cobradas a los usuarios pero no consumidas por ellos.

Finalmente, la resolución en comento estableció que para calcular el Costo Medio de Tasas Ambientales (CMT), en lo que respecta al costo medio de la tasa de uso, la cual corresponde a la tasa por uso del agua establecida por la autoridad ambiental, se afectará por el parámetro  $p^*$ .

#### Resolución CRA 487 de 2009

Esta Comisión de Regulación expidió la Resolución CRA 487 de 2009 a través de la cual presentó a consideración y discusión con los usuarios y agentes del sector la siguiente metodología para el cálculo del nivel de pérdidas aceptable para el cálculo de los costos de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado:

$$p^* = p_{técnica}^* + p_{comercial}^* \quad \text{Ec. 2:29}$$

Donde:

$p^*$ : Nivel de pérdidas aceptable regulatoriamente (%) el cual es particular a cada sistema

$p_{técnica}^*$ : Nivel de pérdidas técnicas aceptable (%) el cual es particular a cada sistema

$p_{comercial}^*$ : Nivel de pérdidas comerciales aceptable equivalente a 7%.

Lo anterior, teniendo en cuenta que “en relación con las pérdidas comerciales, a pesar de que se han desarrollado indicadores que facilitan su medición, no existen metodologías debidamente desarrolladas y probadas que permitan estimar los niveles óptimos o



aceptables de este tipo de pérdidas”. Sin embargo, a partir de información reportada por los operadores, se pudo establecer un rango de pérdidas comerciales que oscila entre el 4,5% y el 9,5% del volumen del agua producida, y teniendo en cuenta que se hace necesario establecer un nivel de pérdidas comerciales aceptable, como señal de regulatoria, el mismo se determinó en el 7%.

Por su parte, las pérdidas técnicas corresponden a la aplicación de la siguiente fórmula:

$$p_{técnica}^*(\%) = \frac{54 \cdot Nac}{AP} \quad \text{Ec. 2:30}$$

Donde:

- *54*: Factor constante regulatorio, definido a partir de metodología de bandas del Banco Mundial con datos correspondientes a las condiciones de los sistemas de acueducto y alcantarillado del país, que establece un volumen anual de pérdidas reconocidas por suscriptor de 54 m<sup>3</sup>.
- *Nac*: Número de suscriptores de acueducto en el año base.
- *AP*: Volumen de agua producida en el año base (m<sup>3</sup>).

Dentro del proceso de participación ciudadana de la citada resolución, la Comisión recibió observaciones reparos y sugerencias al proyecto de resolución, las cuales fueron clasificadas en diferentes ejes temáticos:

Respecto del eje temático de Indicador de Pérdidas, la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (ANDESCO) solicitaba, de manera respetuosa, incorporar un indicador distinto al porcentual para la medición de pérdidas, que sea expresado en términos volumétricos como volumen por kilómetro de red o volumen por usuario facturado, y manifiesta que en la actualidad, la literatura y los desarrollos en esta materia, han demostrado las dificultades de emplear relaciones porcentuales.

Manifestaba igualmente que el concepto general del agua no contabilizada resumida como la diferencia entre el agua producida y el agua facturada en un sistema de abastecimiento de agua potable genera en sí varias distorsiones, las cuales es necesario evaluar previo al análisis de un óptimo en términos económicos. El hecho de relacionar el agua no contabilizada en forma porcentual hace que a medida que los consumos per cápita disminuyen, el índice aumente, sin necesidad de un mayor volumen de agua no

contabilizada. De igual forma, si la producción aumenta debido al aumento en el consumo per cápita, el indicador disminuye sin que esto sea un resultado de la gestión sobre el agua no contabilizada.

También se señala que, en el caso de empresas que exportan agua en bloque, este indicador presenta distorsiones según el criterio seleccionado al interior del Balance Hídrico, es decir, el productor puede tomar para el cálculo del índice, el agua total producida que incluye la exportada más aquella distribuida en el sistema que opera, o tomar únicamente la producción destinada a la distribución. En aquellas empresas que tomen la totalidad producida, el índice será menor respecto aquellas que solo consideren el agua distribuida, mostrando cómo el indicador es sensible a interpretaciones.

Por último, como referencia de un conjunto de empresas, señalaba ANDESCO que este indicador no refleja los detalles de los sistemas como la longitud y antigüedad de redes, así como las presiones del sistema y mucho menos el contexto social de las ciudades donde se presta el servicio y el impacto que puede tener éste en las pérdidas comerciales. Esto lleva a pensar que podría ser utilizado al interior de la empresa como una meta específica, y no como una referencia extraída de datos nacionales o internacionales.

Por lo anterior, considera el gremio que se delimita la posibilidad de emplear el IANC como indicador para efectos de comparación de desempeño entre empresas, por cuanto aunque este indicador es útil como un referente financiero, no permite comparar el desempeño real de las empresas en la gestión de las pérdidas reales y comerciales o aparentes.

Ahora bien, en cuanto al eje temático: Nivel Aceptable de Pérdidas Regulatorio, ANDESCO consideraba que es importante que la señal económica de pérdidas considere las condiciones particulares de cada sistema, teniendo en cuenta la presión real y los aspectos relacionados con la escasez los cuales son identificables por el prestador. Igualmente, solicita empezar a estudiar y revisar una metodología que permita a los prestadores calcular su nivel económico óptimo de pérdidas, para que se constituya en la meta particular para alcanzar en el tiempo, para lo cual se debe establecer con

finés comparativos los indicadores que permitan medir la gestión de las empresas en la obtención de su propia meta particular.

Por su parte, respecto al efecto del nivel de pérdidas en el cálculo de los costos de prestación, señalaba el gremio que la fórmula tarifaria para los costos de operación sólo permite la recuperación de aquellos costos registrados en el año base histórico, razón por la cual no existe un incentivo directo para incurrir en nuevos costos operativos orientados a la gestión de pérdidas. Por el contrario, indicaba ANDESCO, que pareciera que el incentivo está en iniciar los programas con el desarrollo de inversiones, las cuales representan un valor importante al interior de los cargos tarifarios, por lo que el ajuste en el valor de pérdidas reconocido puede inducir a la empresa a descartar acciones de tipo operativo, adelantando inversiones que pueden redundar en incrementos al momento de la formación de precios.

Finalmente, se incluyen observaciones en cuanto Pérdidas Físicas y Comerciales, así:

**Pérdidas Físicas:** Se solicita permitir utilizar los criterios del mecanismo de bandas de acuerdo con las condiciones de presión y disponibilidad de cada sistema, mientras las empresas puedan definir su nivel económico óptimo, bien sea con una metodología señalada por la CRA o con estudios particulares que se lleguen a desarrollar por parte de empresas, de tal manera que la gestión esté dada por las acciones tendientes a cerrar la brecha entre la situación dada por el sistema de bandas y su óptimo económico. Alternativamente, se podría considerar la posibilidad de mantener el criterio del 30% de pérdidas, pero expresado en términos volumétricos, mientras que se diseña un esquema regulatorio que permita definir un nivel óptimo por sistema o tipos de sistema.

**Pérdidas Comerciales:** El nivel máximo del 7%, presenta diferencias importantes respecto a estudios y estimaciones realizadas por las empresas. Por lo anterior, se solicita revisar el límite definido por errores de micromedición, así como el límite propuesto por consumos no autorizados. En este sentido, se solicita igualmente definir un nivel máximo que sea expresado en términos de volumen anual, bien sea por km de red o usuario facturado.

Teniendo en cuenta las observaciones recibidas durante el proceso de participación ciudadana, la CRA consideró pertinente realizar análisis adicionales que permitieran dar una señal regulatoria adecuada respecto de la importancia en la reducción de las pérdidas, y la consecuente planeación de las inversiones y gestiones necesarias para alcanzar un nivel aceptable de las mismas.

## 2.8 Otros sistemas – brechas

Una primera referencia sobre el nivel de pérdidas en Bogotá es su comparación frente a otras Empresas en Latinoamérica, el mundo y Colombia.

El conocimiento de la situación de diferentes empresas con mejores desempeños permite identificar oportunidades de mejora y fija una referencia para la magnitud de las reducciones de pérdidas de la empresa.

Varios aspectos tienen efecto sobre el nivel de pérdidas que reportan las Empresas:

**Nivel de micromedición:** Si el nivel de micromedición no es cercano al 100%, el consumo de agua de los usuarios es un estimado cuyo error hace imprecisa la determinación del nivel de pérdidas. Los niveles de pérdidas bajos cuando no hay micromedición no son una referencia válida.

**Nivel de consumo:** Si el nivel de consumo es alto, la producción es alta para el mismo volumen de pérdidas. Se requiere analizar además del porcentaje de pérdidas el Índice de Pérdidas por Usuarios Facturado (IPUF) como el cociente entre el volumen de pérdidas y el número de usuarios.

Con el fin de establecer el panorama actual respecto de las pérdidas de agua en los sistemas de acueducto, se hizo una revisión de la información disponible tanto a nivel nacional como a nivel internacional de los indicadores de desempeño más conocidos.

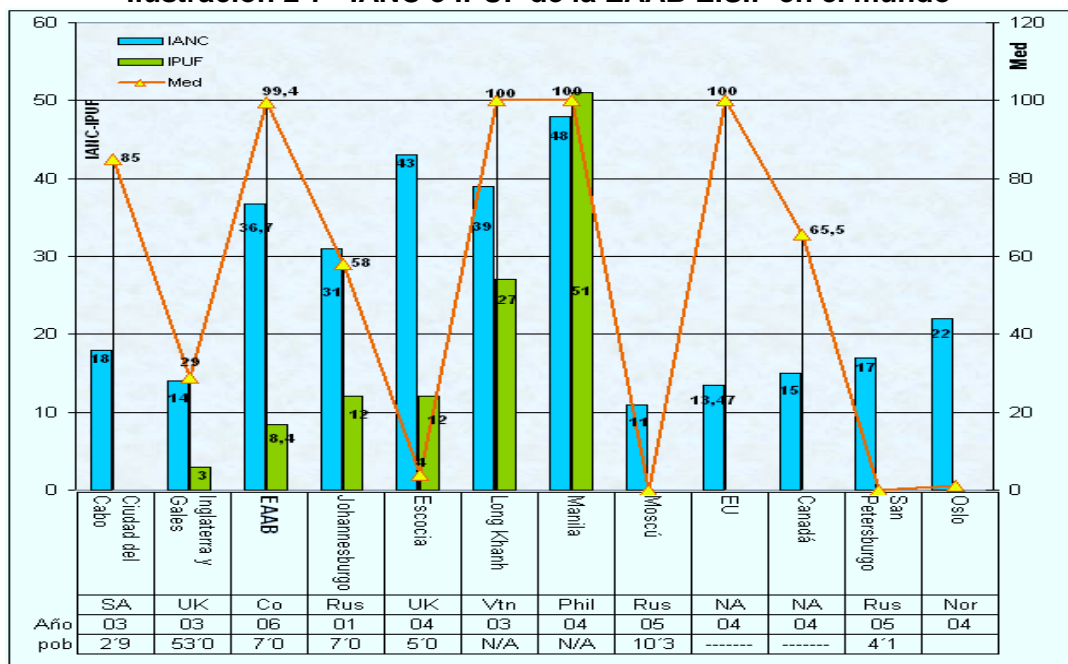
### 2.8.1 Pérdidas de Agua (Datos internacionales)

Tabla 2.8 - Estimativos IANC para países desarrollados y en desarrollo

	Población abastecida (millones 2002)	Dotación (L/hab/d)	Estimativos de IANC					
			IANC (%)	Desagregación (%)		Volumen (Billones de m3/año)		
				Pérdidas Técnicas (%)	Pérdidas Comerciales (%)	Pérdidas Técnicas	Pérdidas Comerciales	IANC Total
<b>Países Desarrollados</b>	744.8	300	15	80	20	9.8	2.4	12.2
<b>Países en Desarrollo</b>	837.2 a	250 b	35	60	40	16.1	10.6	26.7

- a. Basado en una población total con acceso a agua potable de 1902,7 millones de habitantes, de la cual el 44% se abastece a través de conexiones domiciliarias individuales.
- b. Este valor refleja una alta dispersión entre los países en vía de desarrollo, que va desde un valor de 100 L/hab/d para algunos sistemas en los países más pobres o aquellos que experimentan escasez de agua, hasta valores de 400 L/hab/d en grandes ciudades de América Latina y el Asia Oriental. El valor finalmente estimado es un promedio conservador. 35

Ilustración 2-7 –IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en el mundo<sup>3</sup>



La práctica de medir los consumos no es generalizada por lo que las referencias internacionales en pérdidas tienen limitaciones.

<sup>3</sup> : Los datos de Canadá y EU, son un promedio de las ciudades, según el informe “Indicadores de gestión y mejores prácticas” Polioproto F. Martínez Austria. Informe sobre la Evaluación Mundial del Abastecimiento de Agua Potable y el Saneamiento

Tabla 2.9 - IANC para diferentes ciudades Latinoamericanas

CIUDAD	AGUA DISTRIBUIDA m <sup>3</sup> /día	% AGUA NO CONTABILIZADA	PRODUCCION PERCAPITA l/porcápita/día	% VIVIENDAS CON MEDIDOR
Los Angeles (USA)	2.012.400	5	529	100
Chicago (USA)	N/D	10	360	N/D
Toronto (Canada)	1.240.000	10	518	85
Vancouver (Canada)	1.151.000	10	616	25
Calgary (Canada)	474.000	12	543	53
New York City (USA)	N/D	20	632	84
Coquimbo (Chile)	75.904	24	178	100
Santiago (Chile)	1.079.573	26	217	100
Santa Cruz de la Sierra (Bolivia)	109.520	27	144	98
Belo Horizonte (Brasil)	1.069.000	27	276	99
Ottawa (Canada)	340.000	28	525	100
Cali (Colombia)	582.200	29	309	98
São Paulo (Brasil)	5.238.000	30	418	100
Antofagasta (Chile)	70.063	31	168	100
Medellín (Colombia)	766.044	31	422	94
Bogotá (Colombia)	1.266.000	36	154	94
Buenos Aires y Gran Buenos A	3.660.000	33	535	22
La Paz (Bolivia)	129.340	33	166	99
Osorno (Chile)	71.795	35	142	100
Guadalajara (México)	1.028.160	36	347	78
Viña del Mar (Chile)	228.140	38	191	100

Tabla 2.10 - Estimativos IANC para países desarrollados y en desarrollo

CIUDAD	AGUA DISTRIBUIDA m <sup>3</sup> /día	% AGUA NO CONTABILIZADA	PRODUCCION PERCAPITA l/porcápita/día	% VIVIENDAS CON MEDIDOR
Fortaleza (Brasil)	428.000	41	225	83
Monterrey (México)	765.072	42	274	100
Porto Alegre (Brasil)	540.000	43	240	99
Asunción (Paraguay)	310.000	45	363	79
Lima Metropolitana (Perú)	1.932.323	45	328	39
Montevideo (Uruguay)	375.963	45	298	100
Curitiba (Brasil)	505.000	46	193	100
Región Metropolitana (Costa	455.500	47	529	89
Caracas (Venezuela)	1.468.800	50	474	20
Barranquilla (Colombia)	506.375	50	455	49
San Cristóbal (Venezuela)	172.800	54	630	63
Salvador (Brasil)	796.000	57	254	70
Belém (Brasil)	334.000	65	260	44
Guayaquil (Ecuador)	842.950	70	320	29
Maracaibo (Venezuela)	723.139	70	677	N/D
Rio de Janeiro (Brasil)	3.165.000	71	512	33
Recife (Brasil)	498.000	73	267	52

Fuente. DPS 2000

En el caso de la ciudad de Sao Paulo, por ejemplo, a través de un programa de control de pérdidas iniciado en 1969 e implementado a partir de 1977, las pérdidas han bajado

de 35.5% en el sexto bimestre de 1977 a 27.6% en el mismo período de 1981. A comienzos del año 1983 las pérdidas habían bajado a 25%.

Este número todavía es elevado si se compara con las pérdidas constatadas en muchas ciudades de Estados Unidos y Europa, donde normalmente el rango está comprendido entre 10 y 20%.

Sin embargo, 25% es un valor difícilmente observado en las más grandes ciudades de América Latina, donde las pérdidas usualmente están comprendidas entre 30 y 50%.

**Tabla 2.11 – Pérdidas físicas de agua en Bogotá con respecto al estándar internacional<sup>4</sup>**

	Bogotá	Estandar Internacional
Técnicas	51.7 %	70%
Comerciales	48.3 %	30%

## 2.8.2 Pérdidas de Agua en Latinoamérica

La comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico efectuó un cálculo del parámetro IPUF con información disponible para el año 2008, para una muestra conformada por 13 países de Latinoamérica de la Agencia Regulatoria ADERASA, la Secretaria Nacional de Saneamiento Ambiental de Brasil, y el Sistema Único de Información administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos de Colombia, discriminada como se presenta a continuación:

**Tabla 2.12 – Pérdidas físicas de Suramericana**

País	Empresas	Suscriptores
Argentina	3	3.642.389
Brasil	28	27.337.422
Chile	17	4.195.683
Colombia	93	5.688.480
Costa Rica	2	616.154
Ecuador	1	390.308
Honduras	1	14.674
México	2	376.668
Panamá	1	532.140
Perú	10	2.009.188
Paraguay	5	411.145
Uruguay	1	1.257.295

<sup>4</sup> Resultados estudio de sectorización EAAB 1999-2001 para 22 de los 37 sectores operativos de la ciudad.

País	Empresas	Suscriptores
Venezuela	8	2.551.719
<b>Total</b>	<b>172</b>	<b>49.023.265</b>

Muestra de prestadores con información de pérdidas de agua (Año 2008)<sup>5</sup>

Teniendo en cuenta una muestra de 172 prestadores del servicio público domiciliario de acueducto, la cual está compuesta por 93 prestadores colombianos y 79 prestadores latinoamericanos, la información permitió realizar un análisis comparativo del parámetro IPUF para una muestra amplia de prestadores.

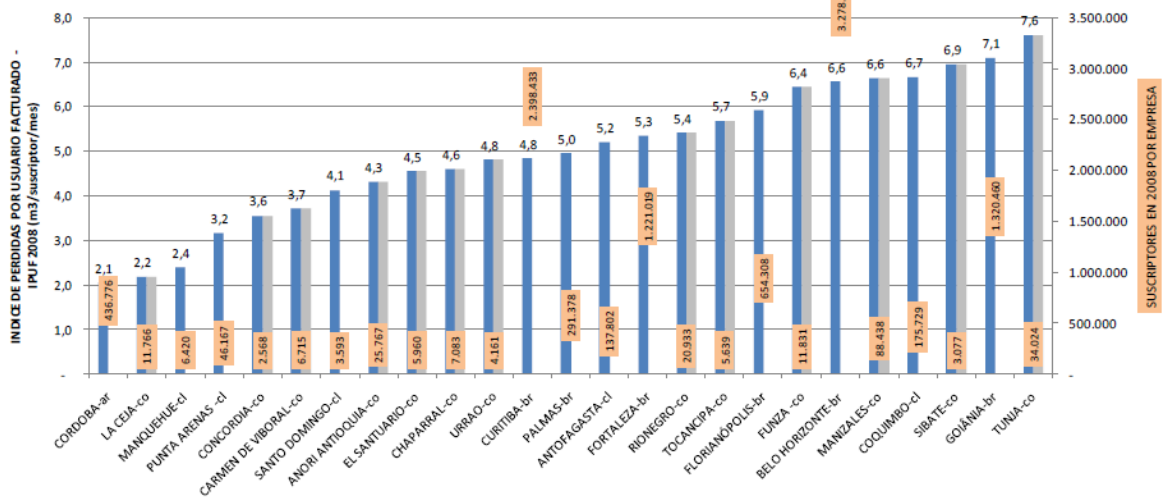
A continuación se presentan las estimaciones realizadas para el parámetro IPUF a nivel Latinoamérica, las cuales están conformadas por:

- Estimación de las 25 personas prestadoras con mejor IPUF en Latinoamérica.
- Análisis del IPUF en Latinoamérica de acuerdo con el tamaño de las personas prestadoras, en cuanto a número de suscriptores atendidos.

#### Las 25 empresas con mejor IPUF en Latinoamérica

Con base en información reportada de las 172 empresas de agua potable en Latinoamérica (93 de Colombia y 79 de otros países), las 25 mejores en IPUF tienen un promedio de 5,0 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes dentro de las cuales hay 13 prestadores colombianos con valores que oscilan entre 2,2 y 7,6 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.

**Ilustración 2-8 – IPUF en Lationamerica – 25 mejores empresas Año 2008 [18]**

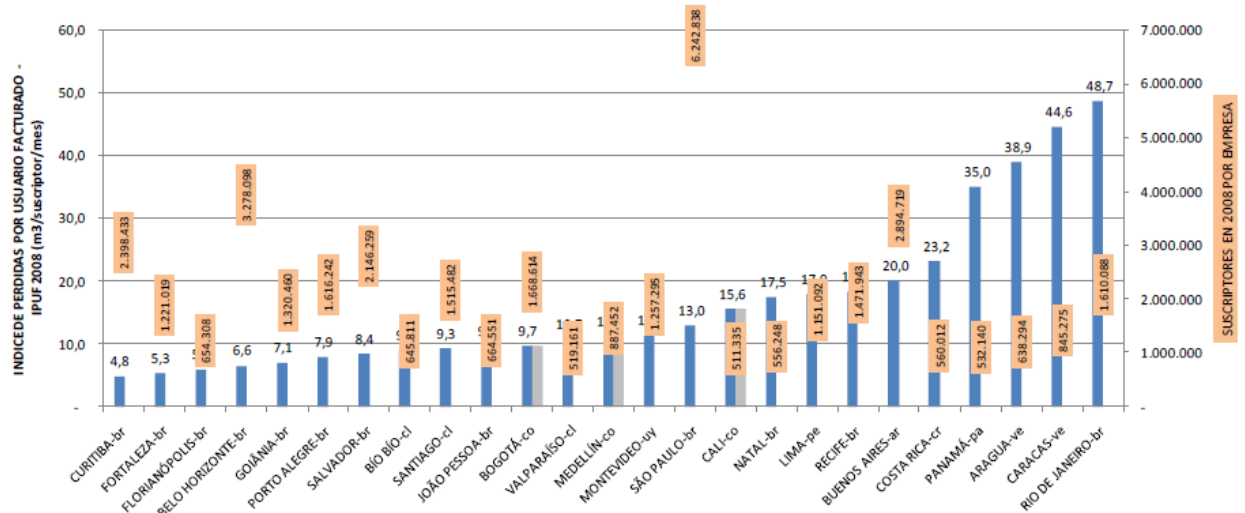




Variación del IPUF según el tamaño de empresas

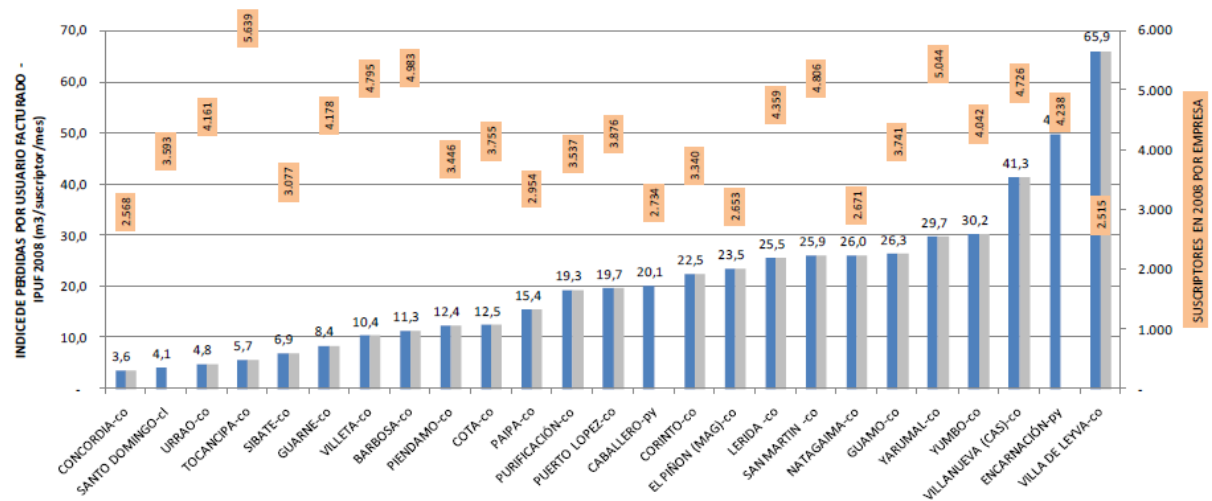
De las 172 empresas analizadas en Latinoamérica, las 25 más grandes tienen en 2008 un IPUF entre 4,8 y 48,7, mientras que el promedio de las 5 de mejor IPUF de este grupo es de 5,9 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.

**Ilustración 2-9 – IPUF en Lationamerica – 25 empresas de mayor tamaño Año 2008 [18]**



Las 25 empresas más pequeñas de las 172 analizadas en Latinoamérica muestran un IPUF en 2008 que oscila entre 3,6 y 65,9, mientras que el promedio de las 5 de mejor IPUF de este grupo es de 5,0 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.

**Ilustración 2-10 – IPUF en Lationamerica – 25 empresas de menor tamaño Año 2008 [18]**



De acuerdo con las estimaciones realizadas, se pueden identificar los siguientes resultados:

En Latinoamérica, las 25 empresas con menores pérdidas por usuario facturado, presentan un IPUF promedio de 5,0 m³/suscriptor/mes.

Por tamaño de las empresas, el rango de las mejores 5 empresas y las mejores 10 empresas presenta un IPUF entre 5,9 a 7,4 para las grandes y entre 5,0 a 8,0 para las pequeñas en m³/suscriptor/mes.

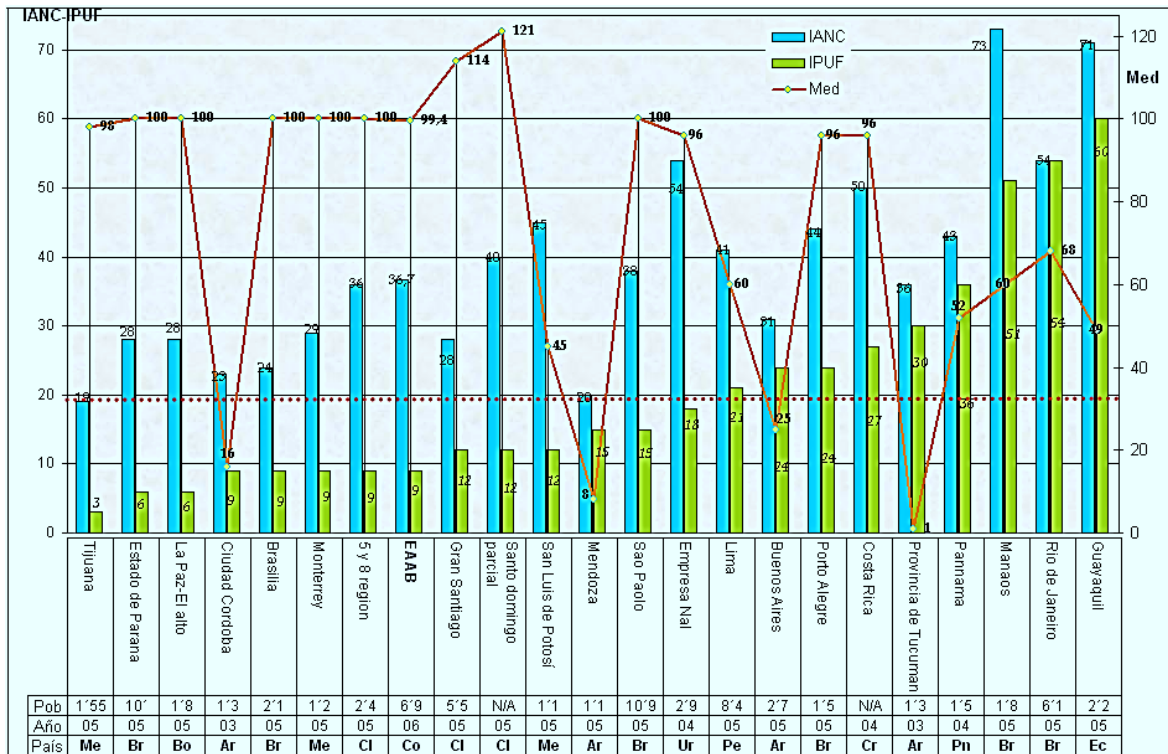
Por lo anterior, un IPUF de 6,0 m³/suscriptor/mes como señal regulatoria se considera adecuado para Colombia.

La siguiente tabla sintetiza los resultados del análisis del IPUF en 2008 para Latinoamérica:

**Tabla 2.13 – IPUF 2008**

Mejor IPUF 2008 (m³/suscriptor/mes)			
	Mejor	Promedio de mejores 5	Promedio de mejores 10
Latinoamerica	Todas	2.1	2.7
	25 más grandes	4.8	5.9
	25 más pequeñas	3.6	5.0

**Ilustración 2-11 – IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en Latinoamerica**



Solo algunas empresas reportan IANC entre el 20% y el 30%.

El IPUF de la EAAB E.S.P es igual al que reportan las mejores empresas en la Región: Aguas Andinas.

Se verifica la existencia de niveles de IPUF más bajos que los de la Empresa, los cuales se alcanzan en plazos de 10 a 15 años mediante la ejecución permanente de programas similares a los que se propone adelantar la Empresa.

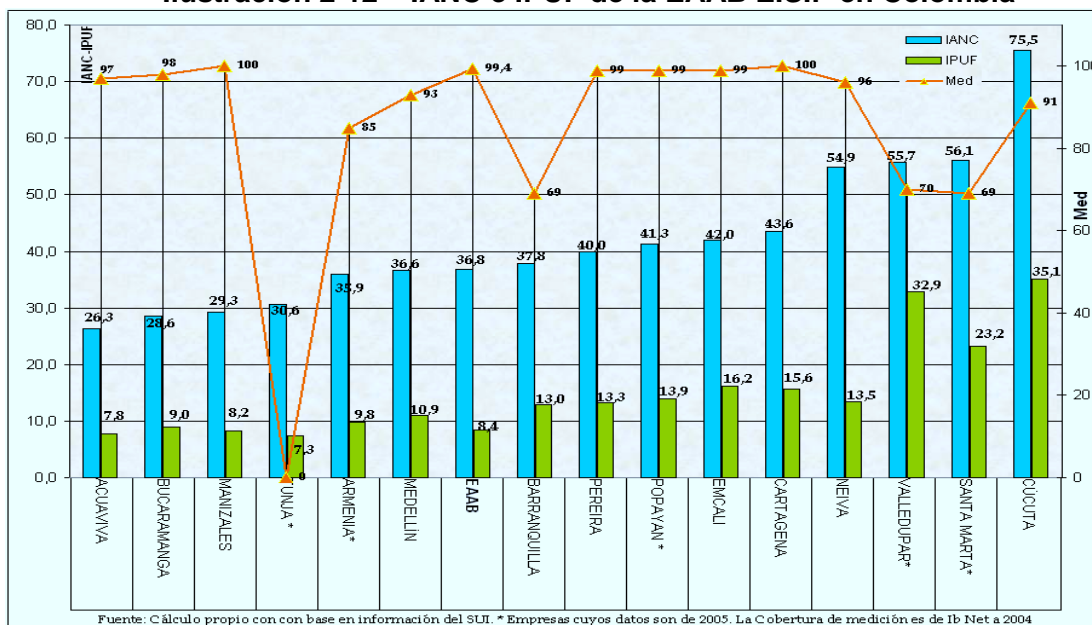
### 2.8.3 Pérdidas de Agua en Colombia

#### El nivel máximo de pérdidas aceptadas por el regulador:

Es un valor agregado que no establece una desagregación entre pérdidas técnicas y pérdidas comerciales porque, entre otras razones, pocas empresas prestadoras reportan o cuentan con esta información desagregada para el caso colombiano.

Es una señal regulatoria de eficiencia, que implica que las pérdidas mayores a este porcentaje no son reconocidas en la tarifa y por tanto no son trasladadas al usuario. Debe ser una señal coherente con las políticas de ahorro y uso eficiente del recurso.

Ilustración 2-12 – IANC e IPUF de la EAAB E.S.P en Colombia



Ninguna de las empresas reporta IANC inferior al 20%.

Aunque Acuaviva (Palmira) no se reporta en la muestra su IANC a Junio de 2007 es 23.75%.

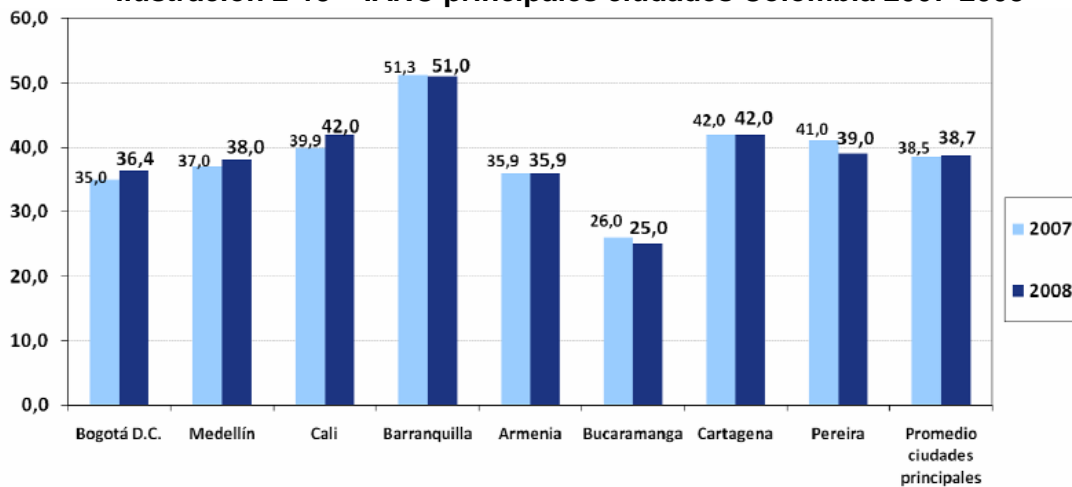
El IPUF de las EAAB E.S.P es uno de los mejores a nivel nacional. Otras fuentes revelan los siguientes datos:

**Tabla 2.14 – IANC en Colombia 1999-2000**

CIUDAD	SUSCRIPTORES	IANC	
		1999	2000
MEDELLIN	867.738	30,5	31,9
BOGOTA	1.223.648	32,4	34,1
CALI	826.144	32,1	34,3
BARRANQUILLA	576.891	43,0	40,0
BUCARAMANGA	164.944	31,3	27,1
MANIZALES	74.515	23,7	30,0
YOPAL	N/D	40,3	36,7
PASTO	51.325	34,5	40,0
PEREIRA	166.996	40,6	41,6
TUNJA	51.157	46,0	42,9
CARTAGENA	111.609	43,9	43,0
IBAGUE	159.686	41,8	44,7
NEIVA	N/D	52,0	53,0
FLORENCIA	32.048	56,3	60,0
SANTA MARTA	N/D	49,4	62,0

Fuente. SSPD 2000

**Ilustración 2-13 – IANC principales ciudades Colombia 2007-2008**

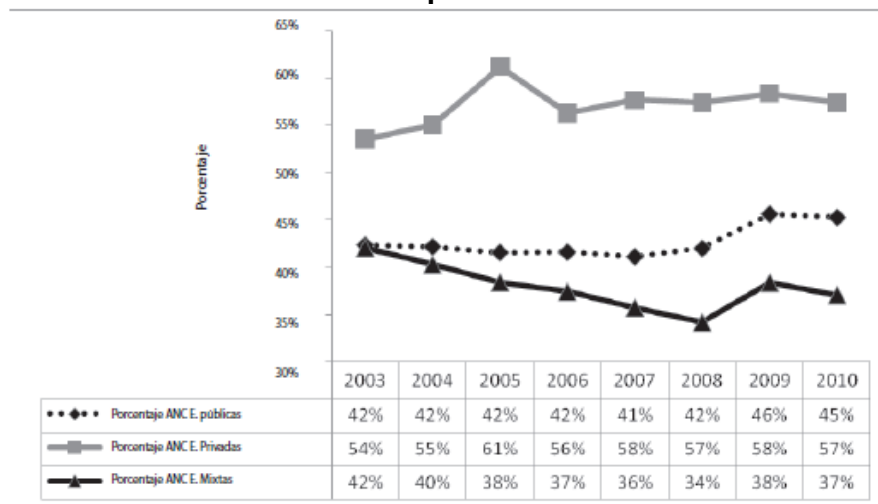


**Tabla 2.15 – IANC en Colombia por Empresas de servicios de agua**

ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA % Empresa	Años							
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P.	46%	41%	41%	42%	48%	45%	45%	40%
Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.	34%	33%	30%	29%	27%	26%	27%	27%
Aguas de Cartagena S.A. E.S.P	50%	48%	47%	48%	42%	42%	45%	44%
Aguas de la Sabana S.A. E.S.P	37%	42%	49%	52%	58%	60%	74%	76%
Aguas de Manizales S.A. E.S.P	32%	30%	27%	27%	28%	27%	35%	35%
Compañía de Acueducto y Alcantarillado Metropolitano de Santa Marta S.A. E.S.P	54%	56%	56%	62%	65%	66%	47%	48%
Empresas Públicas de Armenia	49%	48%	34%	39%	40%	40%	37%	36%
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio E.S.P.	76%	71%	69%	72%	74%	69%	74%	72%
Empresas Municipales de Cali E.I.C.E E.S.P.	40%	40%	39%	40%	40%	42%	50%	65%
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. E.S.P	48%	46%	44%	40%	40%	35%	45%	43%
Empresa de Obras Sanitarias de Pasto EMPOPASTO S.A. E.S.P	38%	39%	40%	41%	42%	40%	41%	46%
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P	41%	41%	41%	40%	37%	40%	44%	39%
Empresa de Servicios Públicos de Valledupar EMDUPAR S.A. E.S.P	52%	44%	52%	56%	60%	56%	57%	50%
Empresa Ibagüereña de Acueducto y Alcantarillado S.A. E.S.P. Oficial de Ibagué	57%	57%	55%	52%	54%	44%	51%	39%
Empresas Públicas de Medellín E.S.P.	36%	37%	36%	36%	37%	38%	39%	36%
Empresas Públicas de Neiva E.S.P	55%	51%	56%	52%	49%	51%	45%	43%
Proactiva Aguas de Montería S.A. E.S.P.	53%	46%	40%	43%	42%	40%	39%	37%
Proactiva Aguas de Tunja S.A. E.S.P.	35%	42%	31%	37%	34%	33%	37%	26%
Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P	55%	57%	66%	58%	59%	59%	61%	60%

Fuente: Cálculos propios con base en los anexos 2 y 3. El índice de agua no contabilizada (IANC), dado que ninguna empresa de la muestra compra agua, se calcula utilizando la fórmula

**Ilustración 2-14 – Evolución índice de agua no contabilizada (IANC) por tipo de empresa**



Fuente: SUI Enero/2012. Cálculos propios JSL.

Fuente: SUI Enero/2012. Cálculos propios. Indicador calculado como metro cúbico de agua producida anualmente por suscriptor dividido en los metros cúbicos de agua facturada anualmente por suscriptor. [18]

Las empresas privadas producen entre 2,15 y 2,58 m<sup>3</sup> para facturar un metro cúbico, las públicas entre 1.70-1.84 m<sup>3</sup> y las mixtas entre 1.52 y 1.72 m<sup>3</sup>, estas últimas con el mejor indicador.

De acuerdo con un estudio realizado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico con el objeto de obtener variables necesarias para el cálculo del

IPUF aceptable y a tener en cuenta en el cálculo de la tarifa de agua, donde se tomó una muestra conformada por 107 empresas prestadoras de Colombia, con por lo menos tres años consecutivos de información disponible en el SUI, entre los años 2007 y 2011. Se obtuvieron las siguientes conclusiones para Colombia:

- Por tamaño de empresas, a nivel Latinoamérica, el rango de las mejores 5 y las mejores 10 en IPUF es de 5,9 a 7,4 para los prestadores grandes y de 5,0 a 8,0 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes para los pequeños prestadores.
- En Colombia, para el año 2008, las 10 empresas que presentan menores pérdidas por usuario facturado, tienen un IPUF promedio de 4,6 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.
- Por tamaño de las empresas, el IPUF mínimos para el año 2008 de los prestadores con más de 100.000 suscriptores fue de 6,5 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes; para prestadores con más de 5.001 suscriptores hasta 100.000 suscriptores, el promedio de los IPUF mínimos fue de 3,6 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes y, finalmente, para prestadores con menos de 5.000 suscriptores el promedio de los IPUF mínimos fue de 1,7 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.
- Por tamaño de las empresas, el IPUF medio para el año 2008 de los prestadores con más de 100.000 suscriptores fue de 11,8 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes; para prestadores con más de 5.001 suscriptores hasta 100.000 suscriptores, el promedio del IPUF fue de 12,6 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes, y finalmente, para prestadores con menos de 5.000 suscriptores, el promedio del IPUF fue de 19,2 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes.
- En conclusión, y teniendo en cuenta el análisis hecho a nivel Latinoamericano y para Colombia, se considera adecuada una señal regulatoria igual a un IPUF\* de 6,0 m<sup>3</sup>/suscriptor/mes para todos los prestadores en Colombia.
- Los niveles de reducción en la producción de agua, que pueden alcanzar los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto, dependen del nivel actual que tiene cada sistema.
- El nivel de producción de agua por suscriptor en cada sistema, se ve afectado por la variación climática y la elasticidad precio-demanda.
- Existen particularidades en cada sistema, que afectan la gestión de pérdidas técnicas y comerciales, que se deben reflejar en los niveles aceptables de producción de cada prestador.
- El uso de indicadores como el ISUF demuestran que en los últimos años los prestadores han disminuido los niveles de producción de agua de forma continua, por lo cual es factible que dicha reducción gradual continúe durante el próximo periodo tarifario.

## **3. Sistema de Acueducto de Bogotá**

### **3.1 Descripción del sistema**

La población atendida está cercana a los siete millones de habitantes en un área de prestación de servicio de 38.000 Ha, quienes demandan un caudal medio diario de 14.90 m<sup>3</sup>/s (año 2008), equivalentes a 1.209.600 m<sup>3</sup> de agua por día, con un cubrimiento poblacional en el distrito capital del 100% de los barrios legalizados. (Libro centro de control) y que representan cerca de 1'693.185 usuarios o abonados en el sistema comercial. [19]

El sistema cuenta con una capacidad instalada de 27.5 m<sup>3</sup>/s incluida la planta de tratamiento de El Dorado, que inició su proceso de entrada en operación en el año 2002, con lo que se concluye que a nivel de producción el sistema sólo demanda un 54.2% de la capacidad instalada; obviamente la totalidad de la misma sólo puede ser utilizada mediante la construcción de los elementos necesarios en las redes de conducción de agua cruda y tratada que permita su distribución.

La disponibilidad adicional del sistema de producción que hoy no requiere su puesta en operación, se debe a la implementación de programas específicos de gestión, tales como el programa de macromedición, sectorización, atención oportuna de la tubería rota, uniformización de presiones y en cierto grado a la disminución de la dotación o consumo per cápita de los usuarios del servicio, generando desplazamiento en los cronogramas de construcción e inversión de nuevas grandes obras, como Chingaza II y Sumapaz, se han motivado así programas y planes de optimización operacional y de disminución de la vulnerabilidad del sistema, como es el caso de la construcción del túnel alternativo de Usaqué y la construcción del tanque de Suba con todas sus obras complementarias.

El sistema de acueducto con que cuenta la ciudad de Bogotá, también abastece algunos municipios aledaños, en el norte a Gachancipá, Tocancipá, Sopó, Cajicá y Chía, en el oriente al municipio de La Calera, en el occidente los municipios de Funza, Madrid y Mosquera y en el sur al municipio de Soacha.

Dentro de su estructura operativa cuenta con 6 plantas de tratamiento, 64 estaciones de bombeo, 56 tanques de almacenamiento, 13 estructuras de control, 16 válvulas estratégicas instaladas en las redes matrices que permiten el manejo macro de la infraestructura de acueducto y alcantarillado.

### **3.1.1 Tres sistemas de abastecimiento**

Los sistemas de captación cuentan con diferentes fuentes de agua cruda, las cuales abastecen específicamente una planta de tratamiento, dada la localización geográfica de las mismas.

Para la planta de Tibitoc ubicada al norte se cuenta con un grupo de embalses denominado Agregado Norte, que permiten la regulación de los caudales de tránsito del río Bogotá donde se tiene la estructura de captación de la planta. También es posible obtener agua cruda desde el embalse de Aposentos, que regula el caudal del río Teusacá.

La planta Francisco Wiesner ubicado en el oriente se abastece del Embalse de Chuza y de algunos pozos de captación de quebradas, cuyos excedentes también son almacenados en el embalse de San Rafael, que para efectos de contingencia permite la operación continua de la planta.

La planta de San Diego ubicada al oriente recibe el agua del río San Francisco, siendo éste el menor de los sistemas de captación de la ciudad. En el sur el sistema de producción cuenta con tres plantas de tratamiento, Vitelma, La Laguna y El Dorado, todas dependientes de otro grupo de embalses denominado el Agregado Sur, que regula el río Tunjuelo, pero en este caso la estructura de bocatoma está directamente localizada en uno de los embalses denominado La Regadera. La planta de Vitelma también cuenta con otra captación exclusiva en el río San Cristóbal.

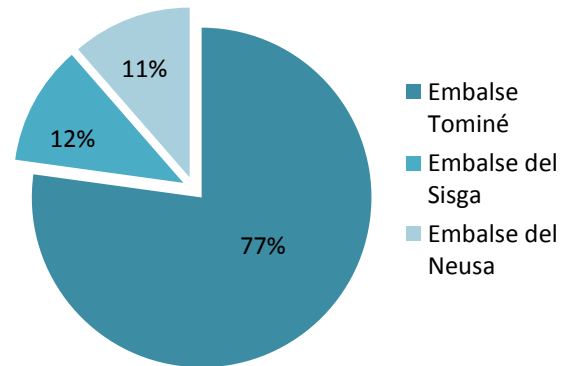


Agregado Norte

Este sistema está localizado en el norte de la sabana, en inmediaciones de los municipios de Gachancipá, Chocontá y Suesca entre otros, y se encuentra constituido por los siguientes embalses:

**Tabla 3.1 – Capacidad Agregado Norte**

CUERPO DE AGUA	VOLUMEN (millones de m <sup>3</sup> )
<b>Embalse Tominé</b>	690
<b>Embalse del Sisga</b>	102
<b>Embalse del Neusa</b>	102
<b>TOTAL</b>	894



La captación de agua cruda para la planta se hace a través de un sistema de compuertas radiales que permiten la entrada del agua a la dársena de presedimentación.

Embalse de Aposentos

Este embalse se encuentra localizado en el bajo Teusacá, al sur del cerro de Tibitoc donde se localiza la planta de tratamiento del mismo nombre, el cual almacena las aguas que fluyen por el río Teusaca antes de desembocar al río Bogotá, cuyo caudal está estrechamente ligado al embalse de San Rafael y por lo tanto al sistema Chingaza.

El embalse tiene una capacidad de 0.8 millones de m<sup>3</sup>, de donde se capta el agua a través de una estación de bombeo que impulsa el agua inicialmente por una tubería y luego por una canal trapezoidal en concreto que finalmente entrega sus aguas a una dársena de presedimentación. Su operación se hace por contingencia o alternativa de suministro.

Sistema Chingaza

Localizado al Nororiente de la ciudad, en la parte alta de la cordillera oriental, se construyó un sistema de captación que incluye el embalse de Chuza con una capacidad

de 257 millones de m<sup>3</sup>, que básicamente regula el caudal circulante en el río Guatiquía a través de un túnel del mismo nombre; desde allí el agua es conducida a través de un sistema de túneles, inicialmente a presión y mediante regulación de una válvula de control de flujo, se pasa a una condición de flujo libre, que desemboca en una canaleta Parshall para medición no solo del caudal procedente del embalse sino de diferentes captaciones de quebradas que se hacen a través de pozos verticales que llegan a los túneles. A partir de la canaleta se tiene otro túnel de menor longitud que luego empata con una tubería de concreto, la cual finalmente llega a la Planta Wiesner.

Los nombres que se dan a los elementos del sistema son: Túnel Palacio – Río Blanco, sectores Chuza y Ventana, captación de pozos de Río Blanco, Túnel El Faro, Conducción de Simayá, Túnel de Siberia y finaliza con el Sifón de Teusacá.

#### Embalse de San Rafael

El agua procedente del sistema Chingaza también puede ser almacenada en el Embalse de San Rafael, a través de una estructura de rebose antes de entrar a la planta de tratamiento. Este embalse tiene una capacidad de 75 millones de m<sup>3</sup>. Otro aporte menor al embalse es el que entrega el río Teusacá. Este almacenamiento permite tener una alternativa de suministro a la planta Wiesner en caso de mantenimiento de los túneles del sistema Chingaza o contingencias del mismo, disminuyendo la vulnerabilidad del proceso de tratamiento de la planta Wiesner hasta por 70 días.

La captación se hace a través de una torre con diferentes niveles de toma, que permite manejar las condiciones de calidad de agua que se extrae del embalse hacia la planta, mediante una estación de bombeo que impulsa el agua hacia la planta de tratamiento a través de una conducción de acero de 60”.

#### Rio San Francisco

Esta fuente se localiza en los cerros centro orientales de la ciudad, cercano a la estación del teleférico del cerro de Monserrate, con una capacidad de captación de 180 L/s que abastecía antiguamente a la planta de San Diego, la cual fue sacada de operación en Junio de 2003; la conducción se hace a través de una tubería antigua de hierro fundido de 14”.

Río San Cristóbal

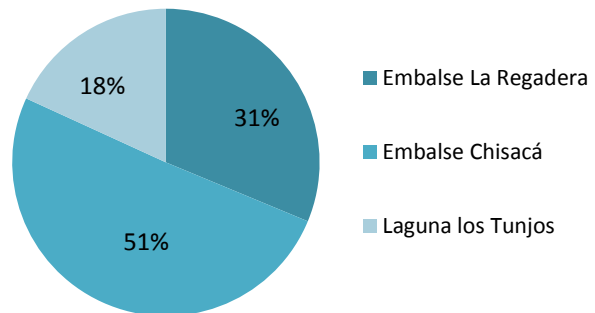
Localizado al sur oriente de la ciudad, aproximadamente en la calle 11 sur, la capacidad de captación que se hace del río San Cristóbal para la planta de Vitelma, es de 450 L/s, la cual es conducida desde la bocatoma a la planta a través de una tubería de 24” de concreto, este a su vez descarga en una estructura de aireación en la planta. El caudal captado es variable dependiente del comportamiento hidrológico a través del año. La planta de tratamiento de Vitelma fue sacada de servicio en junio de 2003 y sólo se habilita para situaciones de contingencia.

Agregado Sur

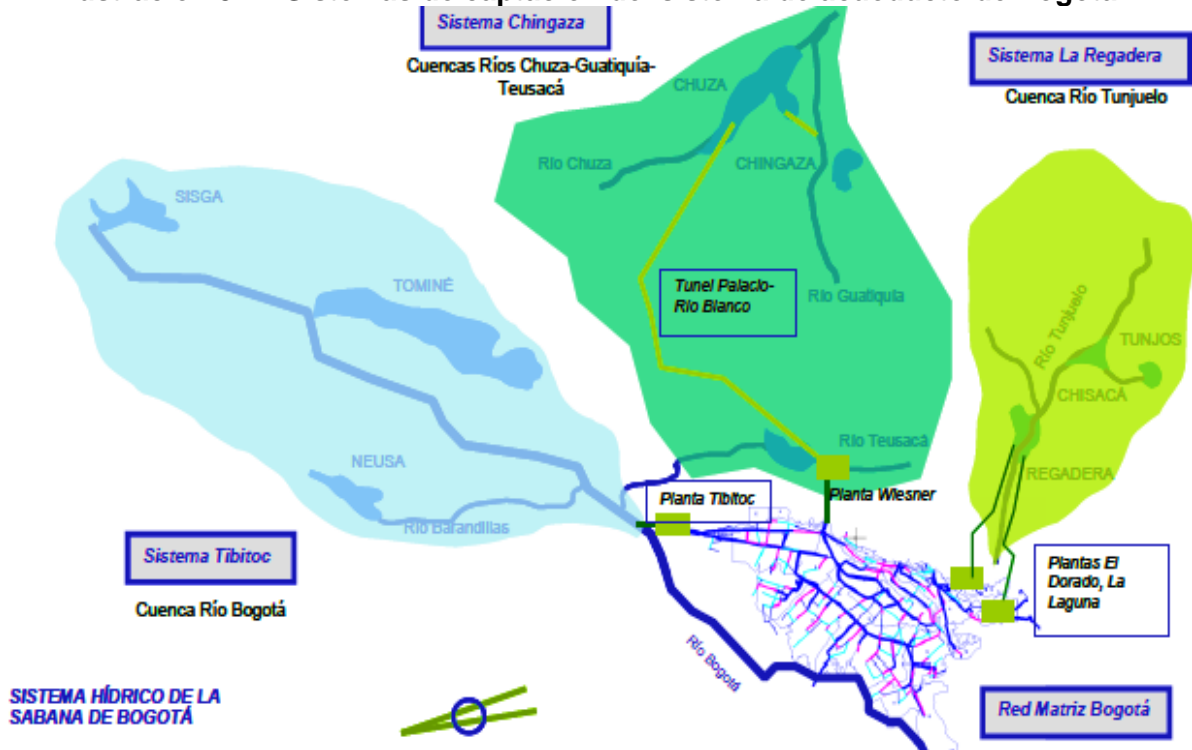
El Agregado Sur es un sistema de embalses que regulan y almacenan el caudal del río Tunjuelo y sus afluentes, como el Curubital y el Mugroso, localizados al sur de la ciudad; los embalses que la componen, con sus capacidades son:

**Tabla 3.2 – Capacidad Agregado Sur**

CUERPO DE AGUA	VOLUMEN (millones de m3)
<b>Embalse La Regadera</b>	4.13
<b>Embalse Chisacá</b>	6.68
<b>Laguna los Tunjos</b>	2.4
<b>TOTAL</b>	13.21



Es importante indicar que el embalse de Los Tunjos hace sus aportes al sistema a través de bombeo en los casos de que los niveles no alcanzan la altura suficiente para descargar sus aguas al río Tunjuelo, para llegar al embalse de Chisacá y posteriormente al embalse de La Regadera. En este embalse se tiene la estructura de bocatoma, que alimenta tanto a la línea de 36” de concreto que originalmente conducía el agua exclusivamente a la planta de Vitelma, pero que hoy en día también alimenta las plantas de La Laguna y El Dorado como a la línea de 20” de acero, que alimenta la planta de La Laguna, ésta última sacada de servicio en Junio de 2003 y utilizada exclusivamente para situaciones de contingencia.

**Ilustración 3-1 –Sistemas de captación del sistema de acueducto de Bogotá**

Fuente: Manual de operación de la red Matriz de la EAAB E.S.P

### 3.1.2 Seis plantas

Las plantas de la EAAB E.S.P son de tipo convencional con excepción de la planta Wiesner que maneja la filtración directa o de contacto. Las plantas convencionales incluyen procesos de coagulación, floculación, sedimentación (convencional o de alta tasa), filtración y desinfección. La de filtración directa no incluye el proceso de sedimentación, eliminando así los decantadores dentro de su conformación estructural e hidráulica, producto de tener un agua cruda con parámetros de alta calidad desde el punto de vista físico-químico y bacteriológico. Esta planta presenta problemas de operación y se considera una de sus vulnerabilidades el tener que trabajar con cambios significativos en turbiedad y color, que genera disminución rápida en la carrera de los filtros, con su consecuente necesidad de disminuir los períodos de lavados y obviamente la capacidad de producción de agua tratada para el suministro, existiendo casos críticos de taponamiento total y salida de servicio de la planta.

El sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá posee seis plantas de tratamiento de agua potable: planta de Tibitoc, planta Francisco Wiesner, planta de Vitelma, planta de La Laguna, planta el Dorado y la planta de San Diego.

### Planta Tibitoc

Localizada al norte de la ciudad entre los Municipios de Sopó y Zipaquirá, tiene como fuente de agua el río Bogotá, regulado por el sistema ya descrito de embalses del Agregado Norte y el embalse de Aposentos como alternativa.

Tiene una capacidad instalada de 10.5 m<sup>3</sup>/s, lo que le significa ser la segunda planta en importancia de la ciudad después de la planta Francisco Wiesner. Su proceso de tratamiento se inicia con una presedimentación del agua cruda en una dársena, la cual alimenta dos estaciones de bombeo que impulsan el agua a la parte alta del cerro Tibitoc, donde se localizan las estructuras de tratamiento.

Cuenta con una mezcla rápida en una estructura de repartición en canales para efectos de la coagulación, que luego pasa a diferentes floculadores y sedimentadores horizontales donde se alcanza la mayor remoción de la turbiedad y el color, dado que el agua cruda que entra tiene un elevado valor de estos parámetros, requiriendo grandes dosificaciones de coagulantes y polímeros como ayudantes de coagulación. El agua clarificada pasa a los diferentes filtros para mejorar las condiciones de calidad, donde se obtiene un agua filtrada que ya cumple con las condiciones físico-químicas, para finalmente recibir la cloración para efectos de desinfección y convertir el fluido en agua potable, la cual cumple con su tiempo de retención y almacenamiento en el tanque de filtros, cuyo gradiente hidráulico máximo para salir a distribución es de 2,666 msnm.

Sin embargo, existe una alternativa de mejorar las condiciones de altura piezométrica del arranque desde un tanque alto con un gradiente de 2,696 msnm, pero que requiere de una impulsión en otra estación de bombeo desde el tanque de filtros. La capacidad de almacenamiento de estos dos tanques alcanza los 50,000 m<sup>3</sup>, con una altura del tanque bajo o de filtros de 4.37 metros y una altura del tanque alto de 6.26 m.

Las salidas de la planta son dos tuberías de 60" y 78" debidamente interconectadas con los tanques de filtros y alto, con válvulas de cierre denominadas V2 y V4 para la línea de

60" y V3 y V5 para la línea de 78", cada una de ellas saliendo del tanque de filtros y alto respectivamente.

#### Planta Francisco Wiesner

Esta planta se encuentra localizada en el municipio de La Calera, al oriente de la ciudad, atraviesa una barrera natural montañosa, mediante una serie de túneles para llegar a la ciudad de Bogotá.

Las fuentes de agua de esta planta son el sistema Chingaza y el embalse de San Rafael, que presentan excelentes características físico-químicas, lo que permite que la planta trabaje por filtración directa, eliminando los procesos de floculación tradicional y sedimentación. Es importante mencionar que el control del flujo de agua cruda desde el sistema de Chingaza se hace a través de la válvula Howel Bunger de 3.30 metros de diámetro, localizada en la transición de presión a flujo libre del túnel Palacio Río Blanco; desde el embalse de San Rafael el agua se recibe a través de la estación de Bombeo con su grupo de 4 unidades, cada una con una capacidad de 5 m<sup>3</sup>/s.

La planta cuenta con una estructura de llegada que entrega el agua a la planta y el rebose al embalse de San Rafael. Existe una estructura que permite una agitación violenta para efectos de mezclar los coagulantes que se adicionan al inicio del proceso de coagulación - floculación, para luego entrar en el canal de repartición que distribuye a las dos baterías de filtros, que tiene un total de 14 unidades y finalmente entregan a la cámara de contacto para efectos de desinfección y almacenamiento, con un volumen total de 50,000 m<sup>3</sup> y una altura de 9.60 metros.

Para efectos hidráulicos y de distribución es importante indicar que el gradiente hidráulico máximo de la planta en la cámara de contacto (CDC) en donde inicia el rebose está en la cota 2,826.20 msnm y el mínimo para efectos de evitar despresurización de los túneles de salida es 2,825 msnm; sin embargo, el nivel mínimo seguro recomendable para operación es de 2,825.50 msnm. De igual manera la capacidad máxima de producción de la planta está fijada en 14 m<sup>3</sup>/s, pero con las etapas de ampliación planteadas puede llegar a producir hasta 26 m<sup>3</sup>/s.

La planta cuenta para efectos de conducción de agua tratada al sistema de distribución con dos túneles, uno de ellos antiguo y sin revestir llamado túnel de Usaquén que empata con un sifón en tubería de acero y regresa luego a su condición de túnel, en el tramo denominado túnel Santa Bárbara y por otro lado un túnel nuevo y revestido denominado túnel Alterno de Usaquén, construido y puesto en operación por la Empresa en agosto de 2002. El conjunto de túneles y tuberías que alimentan a diferentes tanques de la ciudad en forma directa desde la planta es denominado líneas expresas.

### Planta Vitelma

Se encuentra localizada en la zona sur oriental de la ciudad, en la carrera 9 este por calle 8 sur, siendo la planta de tratamiento más antigua de la ciudad, construida por la firma Sanders Eng. Corp. de Portland, Maine de Inglaterra, entre 1934 y 1938. Como se mencionó anteriormente, esta planta fue sacada de servicio y sólo se utiliza para escenarios de contingencia. Sin embargo, el tanque de almacenamiento y la estructura de control que regula el servicio procedente del túnel de los Rosales, se encuentran en operación.

Sus fuentes de agua iniciales eran el río San Cristóbal y el Agregado Sur. En la actualidad sólo es posible habilitar el suministro por el San Cristóbal. Para esta fuente, el fluido llega a la planta mediante una conducción de 24" de concreto y descarga en un tanque de aireadores, pero a través del paso por una estructura de rebose, en donde se unía con las aguas procedentes de la otra fuente, el Agregado Sur a través de una tubería de 36" de concreto, cuyo arranque se encuentra en el embalse de La Regadera, sitio en donde a través de la válvula de salida se hace la regulación del flujo, mientras la regulación de la energía piezométrica se hacía en una cámara de quiebre de presión localizada junto al tanque de los Alpes, cuya importancia radicaba en que ella establecía el control de operación de una turbina Pelton, que hacía la generación de energía eléctrica con que opera la planta.

La planta es de tipo convencional y su capacidad instalada era de 1.4 m<sup>3</sup>/s con ambas fuentes, pero su producción real actual depende de las condiciones del río San Cristóbal. La antigua conducción Regadera-Vitelma fue taponado aguas debajo de la derivación de esta línea a la planta El Dorado. Tiene en su proceso como condición especial dos sistemas de aireación, uno a la entrada y otro a la salida que permiten mejorar las

condiciones físico-químicas del agua en especial sabor y olor. El tanque de almacenamiento es de 38.000 m<sup>3</sup> y se resalta en esta planta el hecho de que no solo se efectúa una distribución por gravedad desde el tanque, sino que existen dos estaciones de bombeo que succionan el agua directamente de este para alimentar los tanques de San Dionisio y El Consuelo. Las salidas de la planta se efectúan para gravedad en 42", 24" y 12", mientras que las impulsiones son en 12" y 16" para San Dionisio y El Consuelo respectivamente.

Es importante resaltar que la planta no tenía capacidad suficiente para atender con su producción su zona de servicio y por lo tanto fue reforzada con un ramal de la líneas expresas que vienen desde la planta Wiesner y que descarga directamente en el tanque, previo paso por una estructura de control de flujo, con la cual se regula el caudal necesario que le permite atender la demanda. El gradiente hidráulico máximo que se puede obtener desde el tanque es de 2,787.5 msnm, el volumen de almacenamiento es de 38,000 m<sup>3</sup> con 7.2 metros de altura.

#### Planta La Laguna

Localizada al sur de la ciudad, junto al antiguo pueblito de Usme, esta planta inicialmente fue construida para funcionar por filtración directa y posteriormente fue ampliada y convertida en una planta convencional mediante la construcción de floculadores y decantadores de alta tasa, que aumentaron su eficiencia y producción en función de la disminución del agua requerida en los procesos de lavado de filtros y por absorber fácilmente variaciones amplias en los parámetros físico-químicos del agua que procede del embalse de La Regadera.

El agua cruda llega a la planta por una tubería de 20" de acero y por una interconexión de 12" tipo CCP de American Pipe con la línea de 34" Regadera – Vitelma. La regulación se hace a través de una válvula controladora de flujo instalada en la planta en la línea de 20" y por una Válvula Reductora de Presión en la línea de 12", también localizada en los predios de la misma.

Con la ampliación, la planta quedó en capacidad de producir hasta 450 L/s, su almacenamiento es de 2,000 m<sup>3</sup>/s y su gradiente hidráulico máximo es 2,890 msnm y una altura de 4 metros. Las salidas de la planta desde el tanque de almacenamiento son en



20” teórico (18” real) para la zona correspondiente al sistema Uval – Monteblanco y 6” para el pueblo de Usme.

Como se indicó anteriormente, la planta sólo se utiliza para condiciones de contingencia. Sin embargo, el tanque es utilizado para atender la zona aferente y al municipio de Usme, con suministro desde el sistema Dorado, a través de la línea Uval-Laguna.

### Planta El Dorado

Localizada al sur de la ciudad, cerca de la nueva vía de salida a Villavicencio, al oriente de la comuna Alfonso López, esta planta de tipo convencional fue construida y puesta al servicio en el segundo semestre de año 2001. Esta es la planta más moderna con que cuenta el sistema, cuya operación se encuentra totalmente automatizada y monitoreada por un sistema que permite el control en tiempo real del comportamiento de todas sus variables físico-químicas y bacteriológicas. La fuente de agua es el Agregado Sur, empata su línea de llegada de 39” en acero con la línea de 34” Regadera - Vitelma, donde igualmente la regulación se hace desde las válvulas de salida del Embalse y por una válvula controladora de flujo instalada sobre la línea de 34”, aguas abajo de la derivación de 39” a la planta, de tal manera que el caudal que se regulaba anteriormente era el enviado a la planta de Vitelma y el excedente quedaba en la planta El Dorado, obviamente teniendo en cuenta el caudal previamente entregado a La Laguna por la interconexión de 12” y el alto índice de clandestinidad tomado de la línea de 34”. En la actualidad, la antigua línea La Regadera-Vitelma atiende a la planta El Dorado y ocasionalmente a la planta de La Laguna.

Esta planta convencional cuenta con un batería de sedimentadores de alta tasa con placas inclinadas metálicas (acero inoxidable) de gran altura, que optimizan el proceso de decantación de los sólidos. Es de resaltar que esta planta cuenta con un sistema de tratamiento de lodos producidos en los proceso de potabilización, en cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

La planta abastece directamente una zona de servicio propia desde sus dos tanques de almacenamiento, llamados Dorado 1 y 2, con capacidad conjunta de 6,000 m<sup>3</sup> y altura de 5.10 m, a través de una tubería de distribución de 16”. También abastece con una línea de conducción de 30” al tanque de Piedra Herrada por gravedad y con una impulsión de

16" al tanque El Paso. Desde Piedra Herrada se conduce el agua al tanque de La Fiscala y al antiguo tanque de Monteblanco.

Su producción máxima es de 1.6 m<sup>3</sup>/s y su gradiente hidráulico máximo es de 2,946 msnm.

#### Planta San Diego

Es la planta más pequeña del sistema con una capacidad máxima de producción de 210 L/s. Está localizada en el centro oriente de la ciudad, en la carrera 3 por calle 26 en el barrio La Macarena (cerca de La Perseverancia), fue puesta en servicio en 1949, para abastecer la zona centro de la ciudad. Esta planta fue sacada de servicio en junio de 2003 y no es utilizada como alternativa en contingencia.

Es una planta de tipo convencional, utiliza como fuente de agua es el río San Francisco, cuyas aguas llegan a tratamiento a través de una tubería de 14" en hierro fundido, proveniente de su captación en el sitio denominado chorro de Padilla, en cercanías del teleférico de Monserrate.

La planta entrega el agua tratada al antiguo tanque de San Diego, el cual sirve de almacenamiento y de cámara de contacto para efectos de desinfección, cuya capacidad es de 5,000 m<sup>3</sup>, con una altura de 3 metros, pero es importante indicar que está interconectado con las redes que salen del nuevo tanque de San Diego, mediante una tubería de 24" en hierro fundido que descarga en la tubería de 42" y 24" que abastecen su zona de servicio. El tanque nuevo de San Diego cuenta con 28,000 m<sup>3</sup> de almacenamiento y una altura de 6.10 m.

#### Planta Yomasa

La planta de tratamiento de Yomasa, ubicada en la cota 3,220 msnm, se alimenta por la quebrada del mismo nombre, surte una pequeña zona ubicada en el Suroriente y atiende los barrios Violetas y otros.

La planta de tratamiento de Yomasa es de tipo compacta, con los procesos de floculación, filtración y cloración. Su capacidad máxima de operación es 15 L/s y en la actualidad su caudal de producción es de 12 L/s.

### 3.1.3 Red de distribución mayor – Red Matriz

El sistema de acueducto de la ciudad lo tiene dividido, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, en Red Matriz Acueducto y en redes de distribución. La definición establece que las líneas mayores a (doce) 12” de diámetro corresponden a Red Matriz y las menores o iguales a redes de distribución, las líneas de impulsión que conectan tanques así sean menores a 12” (doce) pulgadas se consideran matrices. La red matriz también está compuesta por los tanques de almacenamiento, las estaciones de bombeo, las estaciones controladoras de presión, ubicadas sobre las líneas de los diámetros definidos y las estructuras de control, conjuntos de válvulas que regulan caudal y presión.

#### Sistema de conducción de líneas expresas a alta presión

El sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá cuenta con tres tipos de conducciones que le permiten efectuar la distribución del agua que produce en las diferentes plantas ya descritas.

- Sistema de conducción de líneas expresas a alta presión
- Sistema de troncales de conducción y distribución por gravedad a baja presión
- Sistema de bombeo
- Sistema de Líneas Expresas

Por definición son líneas de conducción que transportan el agua desde la planta de tratamiento directamente hasta los tanques de almacenamiento sin alimentar en su trayecto la red de distribución que cubre la demanda de los usuarios del servicio.

En el sistema de acueducto de la ciudad estas líneas corresponden básicamente a las conducciones que salen de la planta Wiesner hacia los tanques de Santa Ana, Chicó, Vitelma, El Silencio, Casablanca, Cazucá y los recientemente construidos de Suba (tanque nuevo) y los tanques que reciben agua a través de la línea de Nororientales en los que se cuentan el de Usaquén (nuevo), Uniceros, Bosque Medina, Bosque de Pinos, Cerro Norte, Soratama y Codito. El sistema principal está constituido por:

**Túnel de Usaquén y de Santa Bárbara:** A partir de la Planta Wiesner en la cota 2825 se tiene el portal de entrada del túnel de Usaquén, cuya longitud es de 2.5 Km, con una sección transversal en forma herradura de diámetro promedio de 3.5 metros.

**Túnel Alternativo de Usaquén:** El túnel Alternativo de Usaquén tiene su portal de entrada en la planta Wiesner, con las mismas condiciones de salida del túnel Usaquén, pero es un túnel revestido, de sección circular de 3.5 m de diámetro y longitud de 2500 metros.

**Conducción Portal de Salida Túnel de Santa Bárbara - Tanque Santa Ana:** Esta conducción arranca en el portal de salida del túnel de Santa Bárbara. La conducción en casi la totalidad de su recorrido tiene un diámetro de 2.30 metros, hasta la micro central de Santa Ana, donde nace la conducción Wiesner– Suba y donde sale la tubería de 60” pulgadas de entrada a Santa Ana o en su defecto al By Pass del mismo.

**Conducción Portal de Salida Túnel de Santa Bárbara - Portal de Entrada Túnel de Los Rosales:** Esta conducción de 78” de diámetro permite la comunicación entre los túneles de Santa Bárbara, Alternativo de Usaquén y el de Los Rosales; en el extremo norte se encuentra el portal de salida del túnel de Santa Bárbara y el empate con la línea hacia Santa Ana.

**Túnel de Los Rosales:** El diámetro de este túnel es de 2.80 m y su longitud es de 9080 metros, con una pendiente del 0.2% y revestido en toda su longitud; con él se atraviesan los cerros orientales de la ciudad. El túnel termina en la parte alta de los predios del Parque Nacional. Este túnel es la conducción que permite llevar el agua por gravedad procedente de la planta Wiesner a tanques localizados en cotas altas que no es posible alimentar o reforzar de zonas de servicio de baja presión sin bombeo o adición de energía piezométrica, por su altura de instalación o distante localización como los casos de los tanques de Casablanca o Cazucá, lo que lo convierte en uno de los elementos de mayor importancia del sistema.

**Ventana El Chicó - Tanque El Chicó:** Esta conducción que se deriva del túnel de Los Rosales en 12”, tiene una longitud 562 metros alimenta el tanque del Chicó.

**Línea Silencio – Vitelma:** La conducción comúnmente llamada Silencio – Vitelma, inicia en el portal de salida del túnel de Los Rosales y termina en el Tanque de Vitelma. Su corredor de instalación es el oriente de la ciudad, inicialmente por los cerros hasta la estación del funicular de Monserrate, donde luego toma diferentes alineamientos por la

zona urbana centro – oriental, hasta llegar al tanque de la Planta de Vitelma bordeando el barrio Altos de Cartagena.

**Línea Silencio – San Diego y Silencio - Casablanca – Cazucá:** Es una conducción de 60” en su tramo inicial hasta el Tanque el Silencio, donde la línea de salida se bifurca así: Un ramal transporta el agua hacia el tanque de San Diego y otro conduce el agua hacia el tanque de Casablanca y Cazucá.

**Línea Microcentral Santa Ana - Tanque Nuevo de Suba:** La conducción permite llevar agua de la planta Wiesner al tanque nuevo de Suba, iniciando desde la microcentral de Santa Ana y terminando en el tanque.

**Línea Nororientales:** permite el abastecimiento de las cadenas que lo componen: Cadenas: Codito, Cerro Norte y Soratama, Bosque de Pinos, Bosque Medina, Uniceros. por medio de varias líneas que pueden operar individual o conjuntamente.

**Línea El Dorado – Piedra Herrada y Piedra Herrada – La Fiscala – Monteblanco.**

El caudal se fija a través de la instrumentación existente, que mide parámetros de caudal básicamente y complementados con los valores de presión aguas arriba y aguas debajo de la válvula de control junto con su apertura, la cual está predeterminada para absorber la variación de la demanda diaria de acuerdo al volumen disponible de almacenamiento.

Para efectos de mantenimiento se tiene aguas arriba de las válvulas de control de flujo, válvulas de corte o guarda, con purga aguas arriba y aguas abajo. No se cuenta con medidor de caudal por cada ramal, sino que se tiene un macromedidor general para toda la estructura, tanto de caudal como de presión.

La PCH (Pequeña Central Hidroeléctrica) Santa Ana, ubicada en los predios arriba del barrio Usaquén, aprovecha la diferencia de altura entre la planta Francisco Wiesner y el Tanque Santa Ana para generar la energía eléctrica. Para ello trabaja con una Turbina tipo Francis de eje horizontal, potencia nominal 12 MW para generar energía con caudales entre 5.5 m<sup>3</sup>/s y 13.5 m<sup>3</sup>/s nominal, saltos netos de operación entre 84 mca y 109 mca, velocidad de rotación 600 RPM, generador tipo sincrónico, capacidad de 15

MVA, factor de potencia 0.80, voltaje de generación 13.8 kV, voltaje de transmisión 34.5 kV. La central se encuentra conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Es importante recalcar que el caudal que se fije en cada una de las estructuras de control debe permitir la menor variabilidad en la producción de la planta, al igual que minimizar el número de movimientos en cada estructura, con esto se evita poner en riesgo la infraestructura de los túneles de Usaquén, Santa Bárbara, Alterno de Usaquén y Los Rosales, por pérdida de nivel en el tanque de la planta Wiesner y tener que elevar la producción a picos que no favorecen la calidad del agua dado su conformación como planta de filtración directa.

#### Sistemas troncales de conducción y distribución por gravedad a baja presión

Son líneas de conducción matriz que permiten alimentar el área aferente de una zona específica de servicio, la cual se delimita a través de una divisoria de cierre permanente, denominada “Divisoria de Servicio Macro”; estas líneas se localizan básicamente en las zonas planas de la ciudad, en donde es posible en condiciones normales efectuar la distribución gravedad, entregando el agua a lo largo de su recorrido, en todos aquellos predios ubicados hasta la cota 2700 m.s.n.m. inclusive.

Debido a que la ciudad se encuentra en su mayor parte (90% del área), entre las cotas topográficas 2580 y 2700 y las condiciones establecidas en las normas de acueducto y el contrato de condiciones uniformes de prestación del servicio con los usuarios establece una presión dinámica en la red mínima de servicio en condiciones de demanda máxima es de 15 m.c.a. y una máxima de 50 m.c.a., se hizo indispensable además del área aferente que puede cubrir cada red matriz o troncal de distribución, definir la zonas de servicio macro por pisos topográficos para alimentar las diferentes áreas urbanas y sus municipios anexos, por lo cual cada una de ellas cuenta con una altimetría específica, unos puntos de alimentación, tanques de almacenamiento y compensación, redes matrices de conducción y distribución, delimitados por una línea divisoria de servicio permanente, que le permite funcionar en forma aislada de las demás en condiciones normales, pero que en eventos de contingencia pueden interconectarse para solucionar o mitigar los efectos de la misma.

Estos subsistemas o zonas de servicio son diferentes de las cinco zonas de gestión técnica, operativa y comercial en que se ha dividido la Empresa, de las cuales se hablará más adelante. A continuación las principales zonas de servicio que conforman el sistema de acueducto de Bogotá:

- Zona Baja Norte (ZBN)
- Zona Baja Sur (ZBS)
- Zona Intermedia (ZI)
- Zona de Servicio Tanque del Silencio
- Zona de Control Santa Fe-Santa Lucía
- Zona de San Diego
- Zona de tanques de Paraíso
- Zona de Control Chico
- Zona Tanque de Vitelma
- Zona de Gravedad Vitelma
- Zona San Dionisio – Consuelo
- Zona de Ciudad Bolívar
- Zona Sur Oriental
- Zona de Control Cazucá
- Zona de La Laguna y El Dorado
- Zona de Servicio de la Caja 5
- Municipios

#### Sistema de bombeo

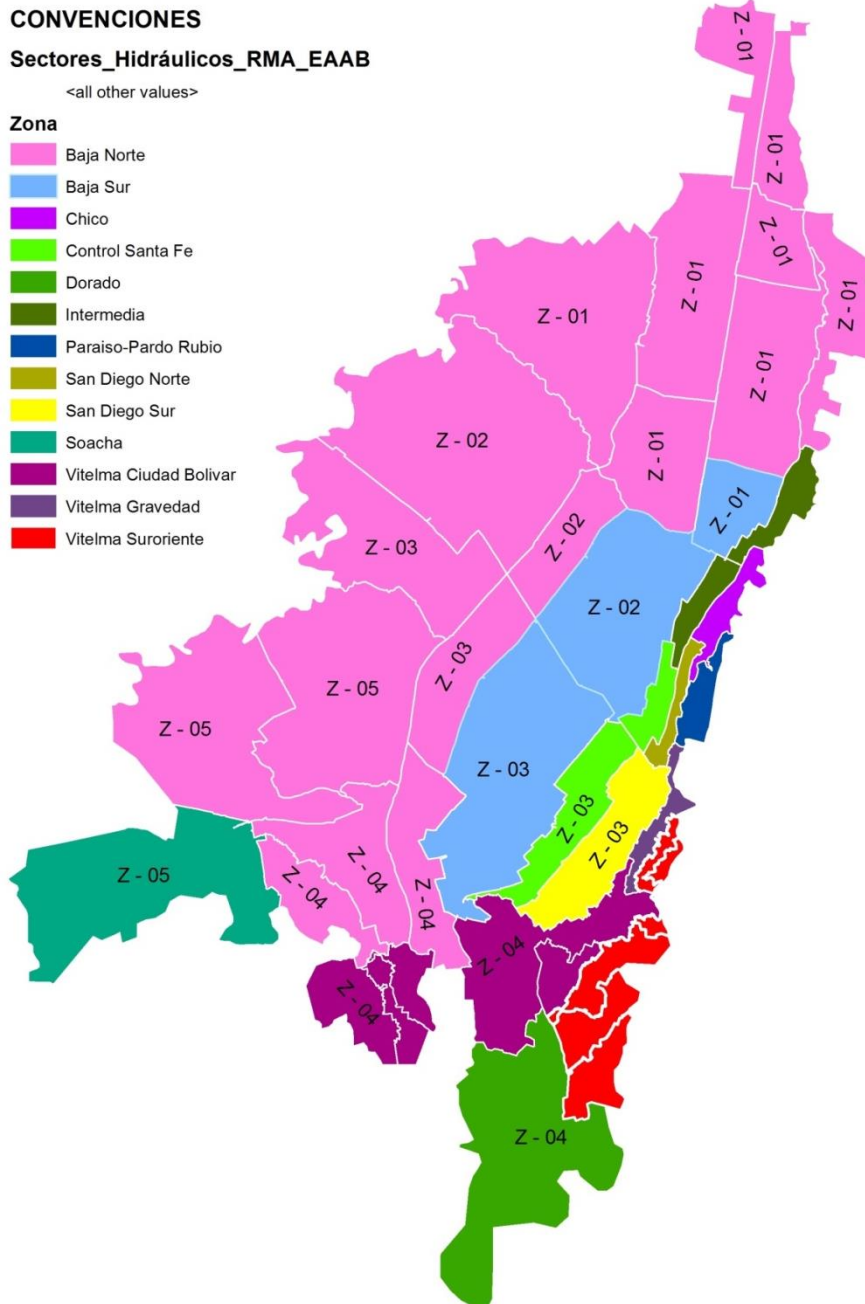
Las redes matrices también se encuentran integradas a las diferentes cadenas de Bombeo de la ciudad, algunas de ellas en diámetros menores como 6, 8, 10 y 12”, pero que por su contexto de línea de impulsión son consideradas en el sistema principal de conducción, almacenamiento y distribución.

A continuación un listado de los principales sistemas de bombeo de la ciudad:

- Sistema de bombeo Coditos
- Sistema de Cerro Norte y Soratama
- Sistema de Suba – Cantalejo (Suba Cerro Norte)
- Sistema de Uniceros
- Sistema de Pardo Rubio – Paraíso

- Sistema El Consuelo – San Dionisio
- Sistema Sur Oriental de Columnas – San Vicente - Alpes – Quindío – Juan Rey
- Sistema Ciudad Bolívar Jalisco – Castillo – Volador – Quiba – Alpes
- Sistema Ciudad Bolívar sector Jerusalén Sierra Morena I, II y III
- Sistema Quintares – Santillana – Julio Rincón

**Ilustración 3-2 – Zonas de servicio EAAB E.S.P**





### 3.1.4 Sectorización Hidráulica

La sectorización es una herramienta de gestión corporativa para la administración y operación de sistemas de acueducto que consiste en la delimitación de la red de Acueducto en sectores o unidades hidráulicas independientes y aislados en los cuales es posible calcular los valores de pérdidas de agua, determinar sus componentes, causas y manejar un programa de recuperación efectivo en términos de costos, con propósitos de optimización de la gestión operativa y comercial.

La sectorización consiste entonces en conformar unidades operativas controladas (sectores hidráulicos) cuya extensión particular no supere un porcentaje determinado y reducido (5-15%) del área total de servicio, como una alternativa para fraccionar geográficamente el problema de controlar la infraestructura (optimizar la operación) y reducir las pérdidas.

En los sectores denominados operativos o hidráulicos, se controlan el suministro de caudales, las presiones de entrega, la macromedición y la micromedición. También se determinan y desagregan por causas ó componentes técnicas y comerciales los índices de agua no contabilizada, para orientar la formulación de proyectos estructurados de control de pérdidas.

La sectorización de la red es por tanto, además de una herramienta de control de la infraestructura, que optimiza la operación del sistema, una estrategia de formulación, seguimiento y control de pérdidas al nivel de sectores.

#### Antecedentes sectorización en Bogotá

Año	Proyecto	Acciones
1989	Estudio conceptual de control de agua no facturada sobre el total de la Ciudad. Se fijan los principios básicos para la determinación de los índices de agua no contabilizada.	Formulación Programa Control de Pérdidas. Formulación de un Programa Piloto.
1990-1992	Crisis financiera principios 90's Pendiente implementación Programa Piloto.	
1992-1993	Se realizan evaluaciones de la sectorización en distritos pilotos por parte de la EAAB.	
1993-1994	La EAAB estructuró la Macrosectorización y la plasmó en planos. Se realizó el presupuesto total del programa y se involucró en el Programa Santa	

Año	Proyecto	Acciones
	Fue financiado por el Banco Mundial. Se realizó el primer estudio general de sectorización para el Sector Occidental de la ciudad.	
1994-1999	Se realizan estudios detallados hasta completar un total de 15 sectores que cubren aproximadamente el 57% de la Ciudad. El alcance de los Estudios progresa desde una concepción puramente operativa, con alto soporte de la Empresa en las tareas de campo, hasta involucrar la investigación y análisis de la parte comercial y dar mayor autonomía al Consultor en las tareas de campo.	Apalancamiento Financiero. Desarrollo de la sectorización hidráulica. Estudios, diseños y materialización simultánea. Implementación macromedición a nivel de sectores
1999-2001	Estudio de Sectorización, Cálculo de IANC, Rehabilitación y Control de fugas de los 22 sectores restantes. Incluyendo el desarrollo de procedimiento, herramientas informáticas y diseño de obras. Se cubre el 43% restante de la Ciudad, Análisis económicos relación Beneficio/Costo.	
2003-2007	Implementación de acciones y Sostenimiento Catastro de Usuarios Control de presiones Armonización de Ciclos de facturación y Sectores Hidráulicos	

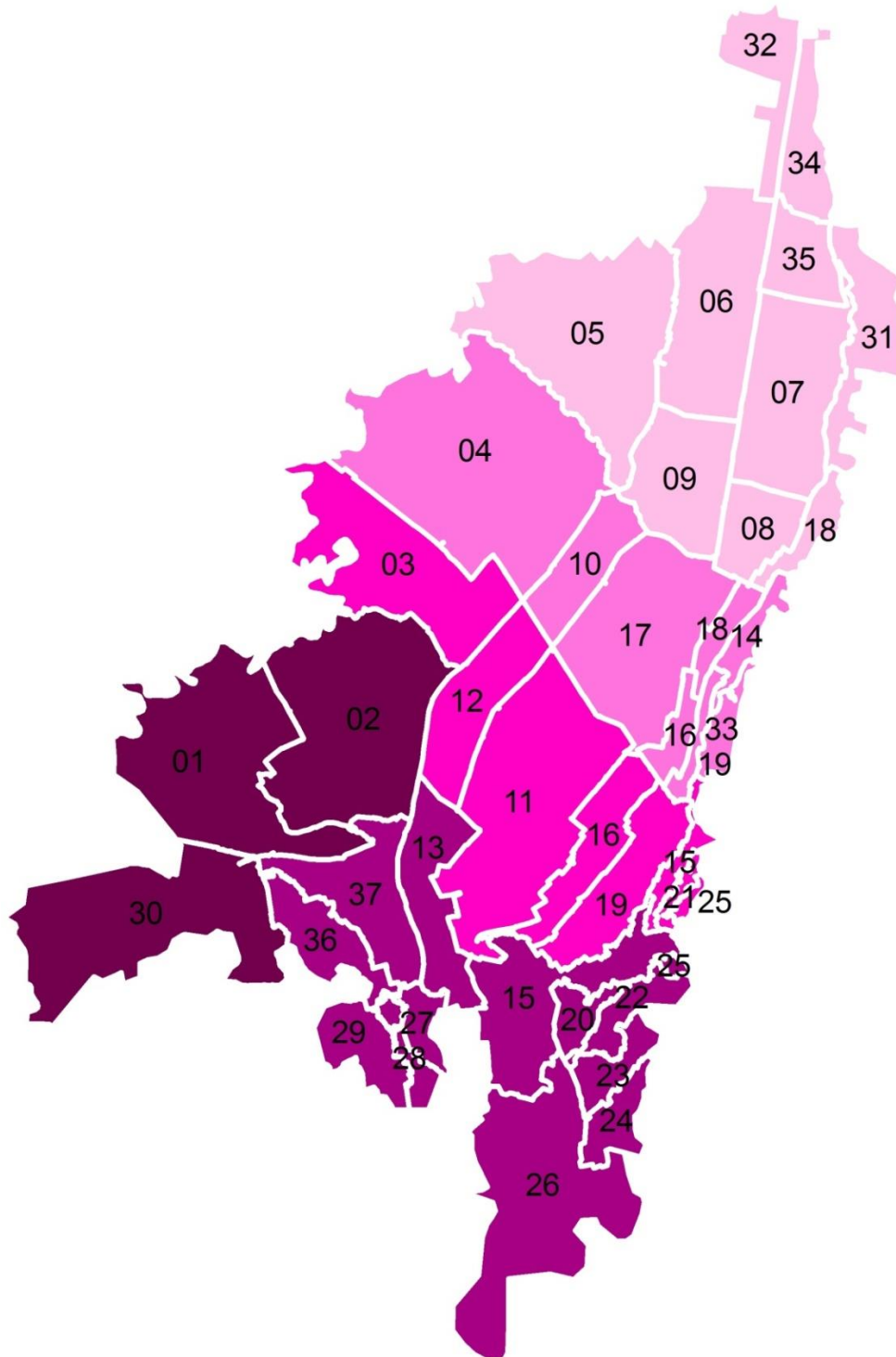
La Empresa de Acueducto de Bogotá logró finalmente para el año 2003 la sectorización hidráulica de todo su sistema. La cual queda conformada por 5 zonas hidráulicas, cada una de ellas conformadas por sectores hidráulicos, y estos a su vez conformados por unidades hidráulicas más pequeñas: subsectores hidráulicos y distritos.



### Sectores

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ha efectuado la sectorización de las redes de acueducto en toda la ciudad mediante la sectorización en 37 sectores, desarrollando los primeros a partir del año 1995 y finalizando en el año 2001.

### **Ilustración 3-3 – Sectorización hidráulica Bogotá**



Se manejan sistemas hidráulicas menores tales como los subsectores, distritos y subdistritos los cuales son operados por las gerencias de zona y no se encuentran aislados permanentemente como si lo están los sectores hidráulicos. La longitud de estas últimas unidades de sectorización (Distrito o subdistritos más pequeño estudiado) se

determina como la longitud mínima que permite obtener resultados de conocimientos de la red (presiones, caudales, IANC y búsqueda de fugas) en condiciones de rentabilidad desde el punto de vista del costo de los trabajos y equipos requeridos para adelantar la investigación.

Una longitud menor consume los mismos recursos de equipos y de personal en la determinación de caudales, presiones, investigación de fugas no visibles, disminuyendo la eficiencia y por tanto la rentabilidad por kilómetro estudiado.

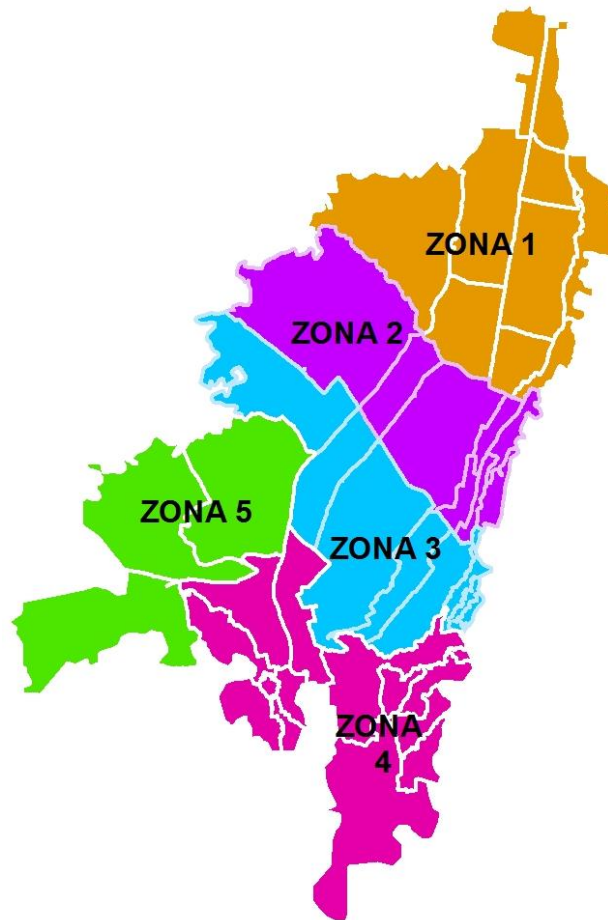
### Zonas

El acueducto para Bogotá se ha organizado en cinco (5) zonas de servicio corporativas para efectos del planeamiento, diseño, construcción y operación de las redes de distribución de acueducto y redes menores de evacuación del alcantarillado, así como la ejecución de los procesos comerciales y de atención del cliente.

Como una herramienta de gestión corporativa, la Empresa agrupó los 37 Sectores hidráulicos en cinco zonas formadas cada una por un grupo de sectores hidráulicos, de tal manera que se pudiese controlar la gestión comercial y las redes de distribución de acueducto y alcantarillado.

La definición de la zonificación se realiza con base a los siguientes criterios:

- Sectorización hidráulica
- Drenaje pluvial y sanitario
- Ríos y quebradas
- Áreas relativamente homogéneas en tamaño y características
- Atención a zonas marginales
- Aspectos geográficos y de capacidad de movilización

**Ilustración 3-4 – Zonas Bogotá - Sectorización**

#### Municipios

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, E.S.P suministra agua tratada no solo a la ciudad capital sino también a los municipios aledaños de: Sopo, Tocancipá, Gachancipá, Cajicá, Chía, La Calera, Funza, Mosquera, Madrid y Soacha y presta el servicio de alcantarillado a la ciudad de Bogotá.

#### Revisiones para garantizar la sectorización

- Divisorias de zona (1/año)
- Divisorias de sector (0.5/año)
- VCP (2/año)
- Aislamiento de subsector (1/año)
- Mantenimiento de sondas (1/año)

### 3.1.5 Macromedición

La Macromedición es el conjunto de equipos, personal y actividades destinadas a obtener, procesar, analizar y divulgar los datos de conducción y distribución, relativos a caudal, presión y nivel de agua de cada uno de los puntos significativos que conforman un sistema de acueducto.

#### Objetivos de la Macromedición

- Facilitar la adecuada y eficiente operación y control del sistema de acueducto.
- Determinar el suministro óptimo de agua para mantener el equilibrio del servicio en las diferentes zonas de la ciudad.
- Evaluación hidráulica permanente del comportamiento del servicio y de los elementos significativos del sistema de acueducto para operación, planeamiento y diseño de la red de acueducto.
- Entregar el valor real del agua suministrada a la ciudad y a cada una de las Gerencias de zona, con el fin de que puedan calcular el agua no contabilizada y sus componentes, hacer seguimiento a su evolución y comportamiento y realizar los trámites frente a las acciones establecidas para su disminución.
- Obtener la demanda per cápita real del sistema y de las diferentes zonas de abastecimiento.
- Establecer el grado de utilización de los elementos de la red y permitir el análisis de su período de saturación.

#### Clasificación de la Macromedición

##### a) Macromedición en plantas

- Procesos Unitarios de Producción
- Medición directa a la salida

##### b) Pitometría

##### c) Macromedición en redes:

- En Estructuras de Control
- En Estaciones de Bombeo

- En Sectores Hidráulicos: La medición de los volúmenes de los sectores hidráulicos fue diseñada e implementada de tal manera que la zona plana de la ciudad cuente con equipos instalados directamente en las redes matrices de alimentación y en los sectores de media ladera o zonas topográficas montañosas donde se requieren estaciones de bombeo y tanques ó estructuras de control de flujo; se han acogido inicialmente los puntos de medición existentes en las impulsiones de las estaciones para inferir el volumen de distribución teniendo en cuenta el almacenamiento producido en los tanques que alimentan la salida de distribución.

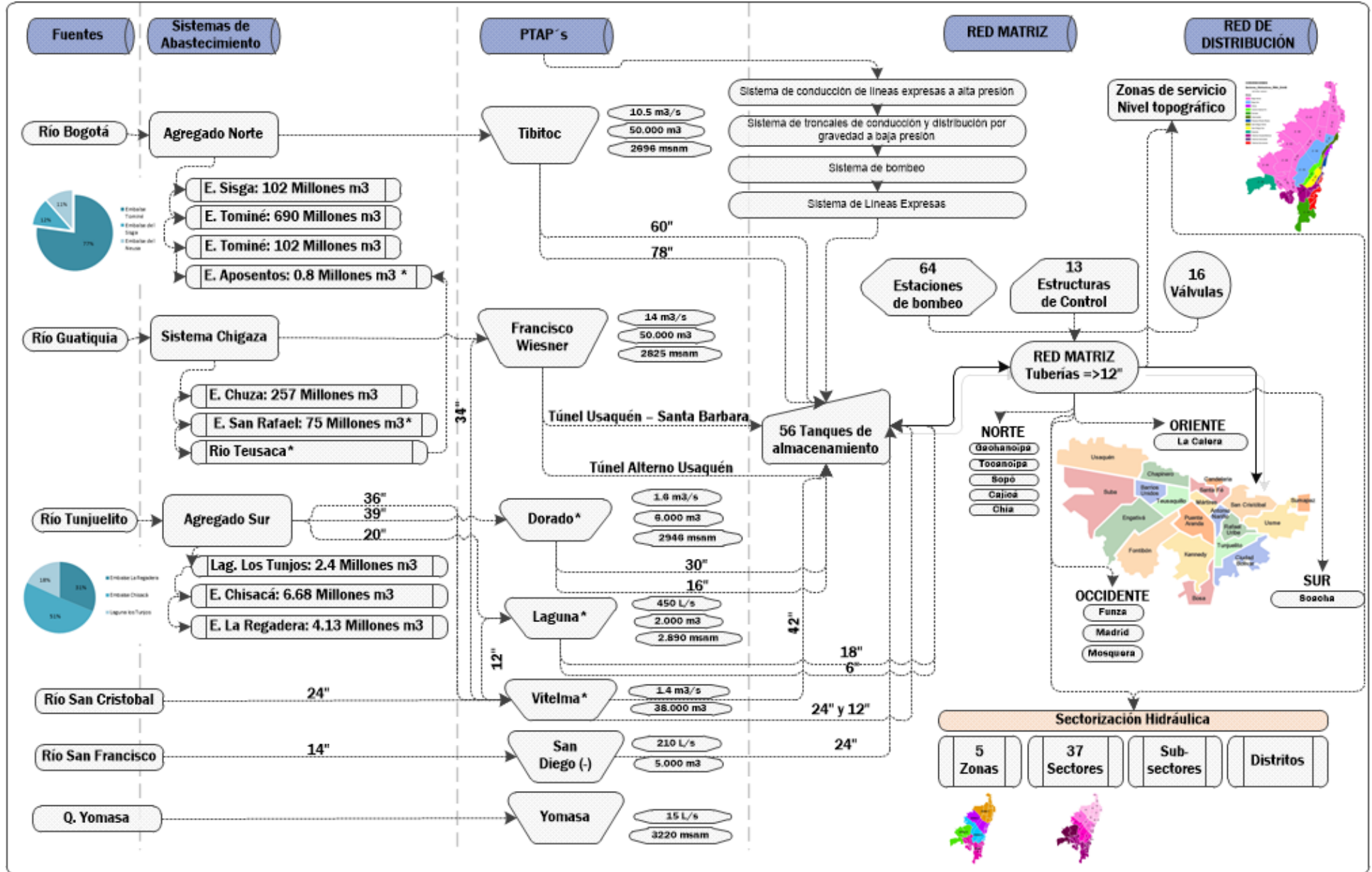
De acuerdo con lo anterior, se tienen dos tipos de infraestructura en los procesos de medición, una definida para el caso de los sectores planos, basados en tecnología de ultrasonido, los cuales se encuentran instalados en diferentes puntos de la ciudad, mientras que los medidores de las estaciones y estructuras de control por lo general son de tecnología primaria Deprimógenos (diferencial de presión) con transductores secundarios electrónicos tipo DPG, con integración o totalizador en algunos casos o en otros se ha efectuado la instalación de Data Logger; en algunas otras ocasiones se cuenta con medidores volumétricos con conteos mecánicos

- En troncales de conducción
- En Municipios

## 3.2 Flujo del agua

A continuación un resumen del flujo del agua desde el momento que es captada hasta que es distribuida al usuario final:

Ilustración 3-5 – Flujo del agua





## **3.3 Flujo de la información**

### **Entrada de datos**

#### Recolección

Red Matriz: El caudal suministrado se determinará con base en el registro de los macromedidores instalados en los puntos establecidos en el Manual de Macromedición.

#### Recibo de datos

El décimo día hábil de cada mes, la Dirección Red Matriz Acueducto remitirá el Informe de Macromedición a cada una de las Gerencias de Zona a través de correo electrónico y posteriormente en medio físico. Si la Gerencia de Zona tiene observaciones las deberá informar a la Dirección dentro de los treinta (30) días siguientes a la recepción del Informe en medio físico, de lo contrario se asumirá que el informe fue aceptado por la Gerencia de Zona y los volúmenes de caudal serán ratificados. Se firmarán Actas de Conformidad por periodos TRIMESTRALES entre la Dirección Red Matriz Acueducto y la Gerencia de Zona.

### **Procesamiento de datos**

#### Cálculos

Completar datos faltantes: Revisar la completitud de los datos, es decir, para el caso de los equipos que graban datos de caudal cada media hora, debe existir 48 registros de caudal por día y en el caso de los equipos que graban caudal cada quince minutos debe existir un total de 96 registros por día.

Si existen vacíos de información, se deben completar de acuerdo con el procedimiento de ajuste de datos de caudal establecido en el Manual de Macromedición. De igual manera, se analizan las posibles fallas técnicas presentadas en el equipo de medición que afecten la continuidad de los datos, para lo cual se debe realizar ajuste de los períodos de tiempo usando el procedimiento establecido en el Manual de Macromedición,

Gráfico de curva por día: Se analizan las curvas diarias de consumo para determinar los picos y/o valles presentados en los datos de caudal reportados por el equipo de medición, con el propósito de identificar si son originados por movimientos operacionales de la red o por falla en el registro de datos del equipo.

Encontrar datos atípicos: Si el comportamiento atípico del equipo de medición se debe a falla técnica se realiza ajuste de datos de caudal de acuerdo con el procedimiento establecido en el Manual de Macromedición versión vigente. En caso contrario, los datos de caudal se reportan tal y como los registra el equipo.

#### Determinar desviación

Calcular caudales promedios diarios y mensuales: Luego de analizar el comportamiento de la curva de consumo, se incluyen los datos de caudal promedio diario en la tabla resumen de cada sector hidráulico de acuerdo con el balance de los puntos de medición según corresponda y posteriormente se calcula el caudal promedio mensual y de cada punto de medición y el volumen diario y total del Sector.

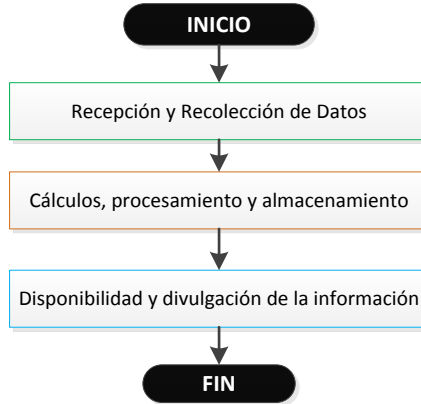
#### Calcular volúmenes diarios y mensuales

Descontar volúmenes mensuales: Al finalizar el análisis de datos se descuenta de cada entidad hidráulica, según aplique, los volúmenes (consumos técnicos) utilizados en el lavado por hidrantes y otras operaciones de la red. Así mismo, éste valor se descuenta del total de caudal suministrado a la Zona correspondiente.

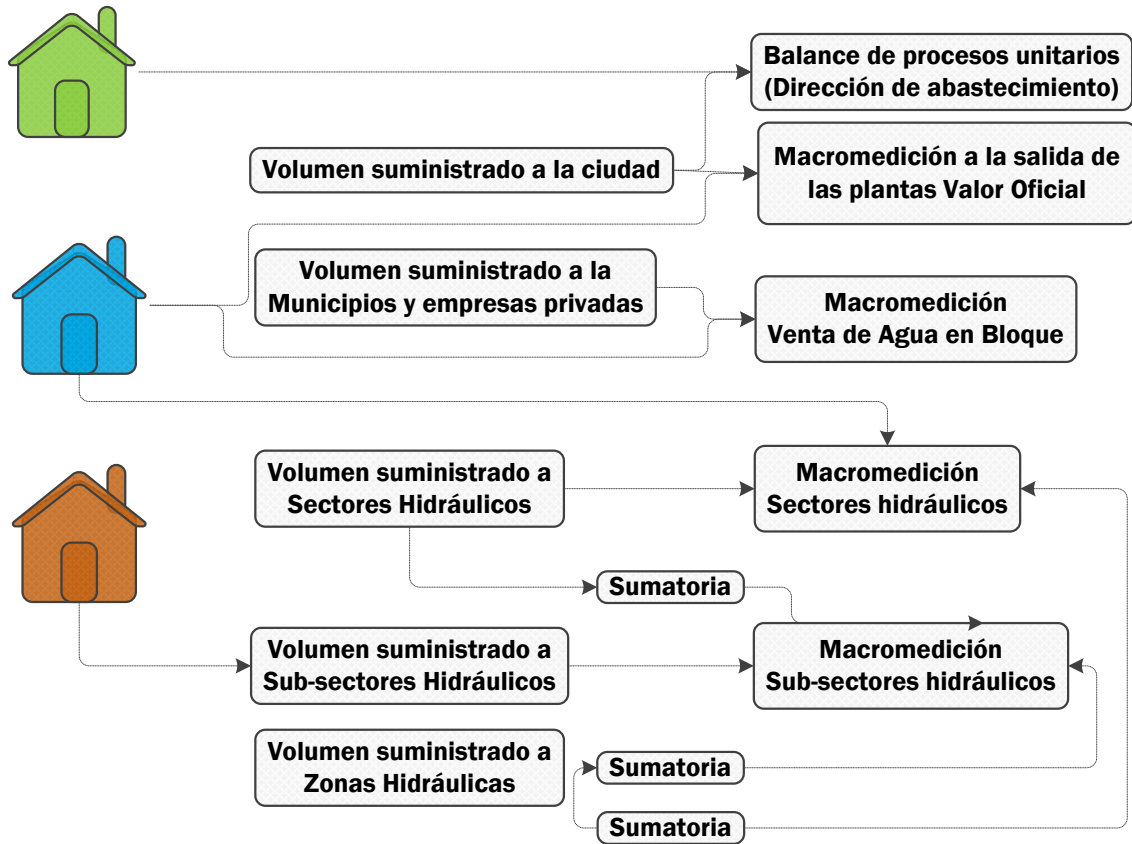
Comparar resultados: Una vez se consoliden los datos de caudal por Sector, se analiza el caudal promedio mensual de cada punto de medición comparado con el caudal promedio del mes anterior, con el propósito de analizar la tendencia de medición registrada. En el caso que exista una diferencia de +/- 20% de los datos analizados de un punto de medición comparado con el caudal promedio del mes anterior, se debe seguir el procedimiento de análisis establecido en el Manual de Macromedición versión vigente.

(Macro y microprocesos, fuentes de información, áreas responsables, limitaciones, tipos de errores, información disponible, información técnica, operativa y comercial, macromedición, Indicadores de gestión) la ciudad de Bogotá.

**Ilustración 3-6 – Procesamiento de datos macromedidos**



**Ilustración 3-7 – Determinación de volúmenes de suministro**



### 3.3.1 Indicadores de gestión

TIPO	INDICADOR	LIMITES
<b>Operación del sistema</b>	Oferta hidráulica	>110%
	Continuidad del servicio	>99.7%
	Respuestas a imprevistos cierres inesperados	<3 horas
<b>Control</b>	Cumplimiento de presiones	>20 mca
	Control de calidad de agua	>97%
<b>Gestión de la sectorización</b>	Continuidad macromedición	>97%
	Precisión macromedición de caudal	>97%
<b>Mantenimiento Correctivo</b>	Reparación oportuna de daños	< 12 h para $\emptyset \leq 12$ "
		< 36 h para $12 < \emptyset \leq 24$ "
		< 48 h para $24 < \emptyset \leq 48$ "
		< 60 h para $48 < \emptyset \leq 78$ "

Ilustración 3-8 – Determinación de volúmenes de suministro

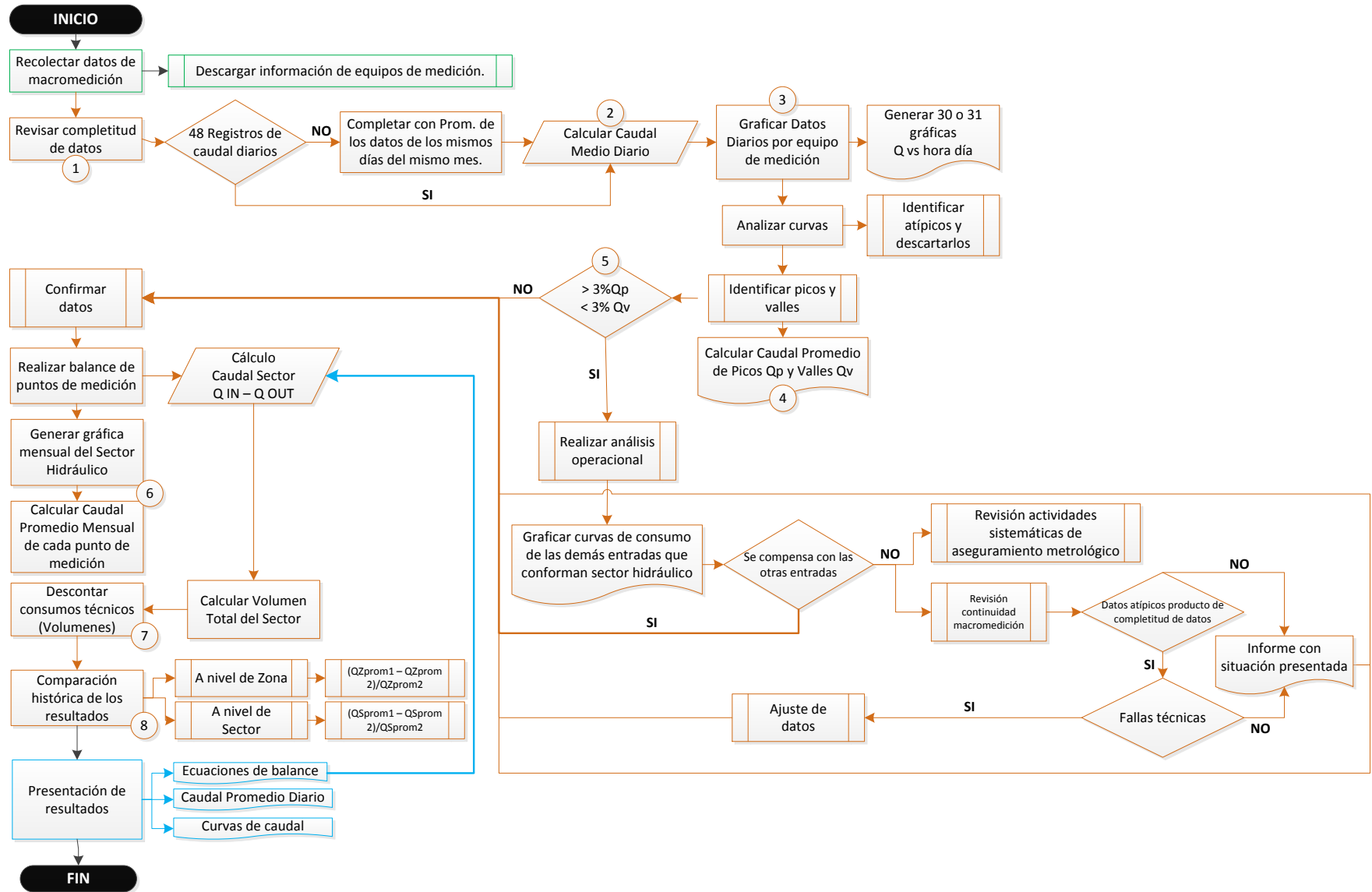
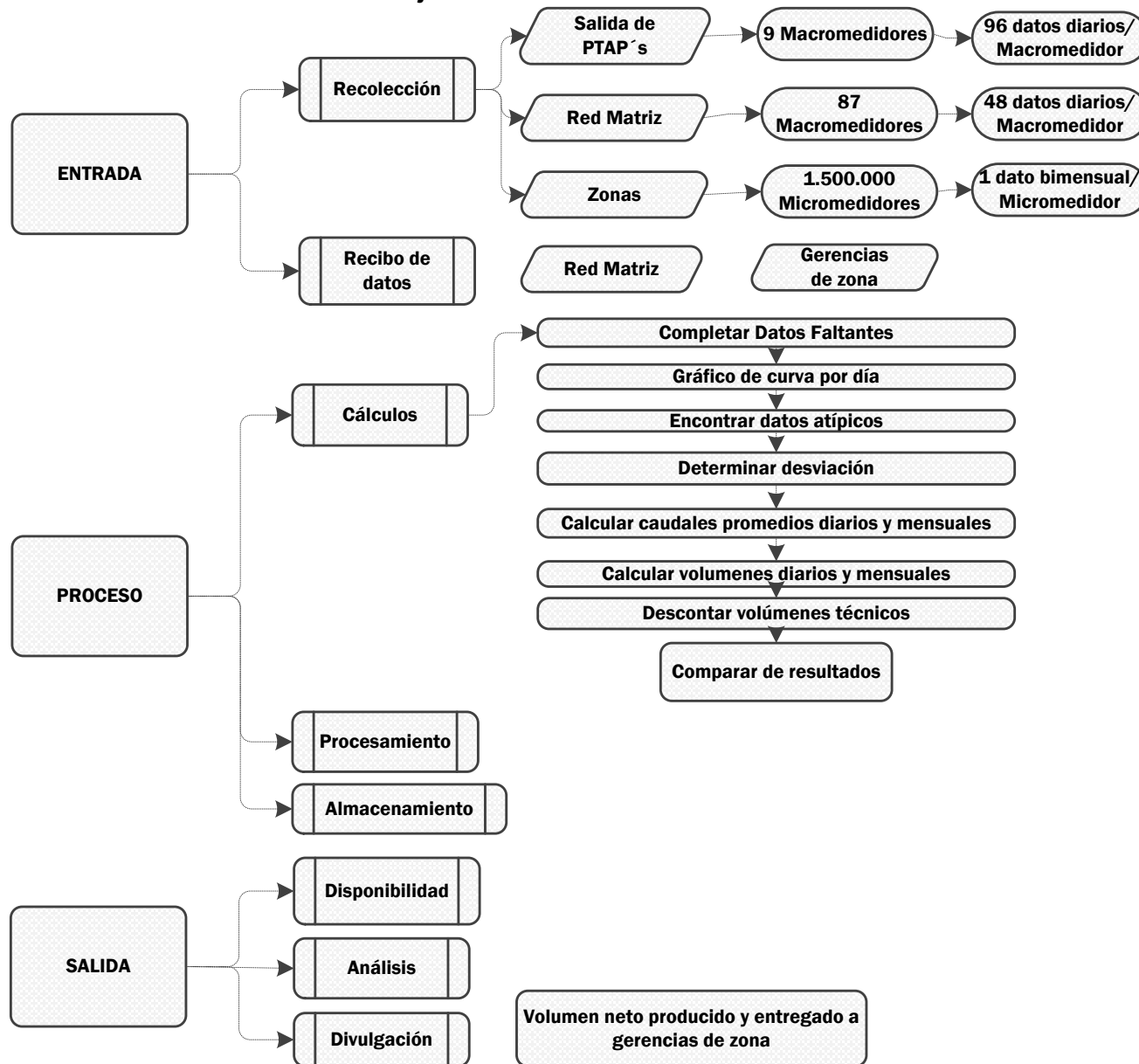


Ilustración 3-9 – Flujo de información Balance Hídrico EAAB E.S.P



## **4. Modelo Conceptual - Análisis de Incertidumbre**

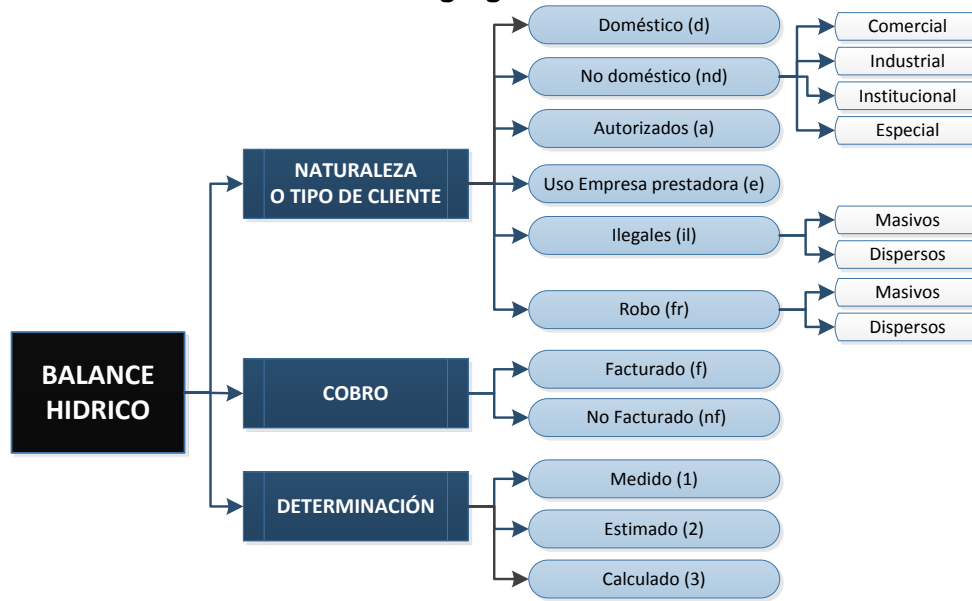
### **4.1 Ecuaciones de cálculo o estimación de cada componente. Análisis por componentes**

La gestión técnica de un abastecimiento de agua y la lucha contra la pérdida y desperdicio de agua pasa por la realización de un balance hídrico lo más exhaustivo posible del abastecimiento objeto de estudio.

El balance hídrico en una entidad de sectorización está orientado a determinar como se distribuye el caudal suministrado a la red de distribución entre distintos destinos (básicamente consumos de todo tipo y pérdidas físicas) con el fin de determinar para cada Entidad el IANC o los indicadores en los cuales se este interesado, el valor absoluto de las pérdidas y desagregarlas por causas componentes Técnicas o Comerciales.

Mediante el balance hídrico se desagrega el cálculo de los índices de pérdidas según sus causas: técnicas o comerciales. El balance hídrico propuesto por la American Water Works Association (AWWA), propone una discretización de las pérdidas según su naturaleza o tipo de cliente, según el tipo de cobro y según su determinación, el detalle se presenta en la siguiente gráfica para un mejor entendimiento:

**Ilustración 4-1 – Desagregación del Balance Hídrico**



Para su mejor entendimiento y posterior desglosamiento se presenta en la siguiente gráfica la notación de cada una de las variables producto de la desagregación que será de uso y referencia en el resto del documento de la presente investigación. Esta notación inicia con la letra C de consumo, continua con las letras d o nd, que se refieren a doméstico o no doméstico, siguen con las letras f o nf que se refieren a facturado o no facturado y los números 1, 2 o 3 que significan medido, estimado o calculado, respectivamente.

**Ilustración 4-2 – Definición de componentes Balance Hídrico**

		COBRO	
		FACTURADO	NO FACTURADO
N A T U R A L E Z A	DOMÉSTICO	Cdf1 / Cdf2	Cdnf1 / Cdnf2
	NO DOMÉSTICO	Cndf1 / Cndf2	Cndnf1 / Cndnf2
	AUTORIZADOS	- / -	Canf1 / Canf2
	USO EMPRESA P.	-	Ce1/Ce2
	ILEGALES	-	Cil2
	ROBO	-	Cfr2



El balance hídrico propuesto por la American Water Works Association (AWWA) se enfoca en discernir entre lo que se denomina agua controlada y agua no controlada. El agua controlada proviene de todos aquellos consumidores que disponen de un medidor de volumen que permite almacenar con cierta precisión los volúmenes consumidos o el consumo autorizado, ya sea facturado o no facturado. Asimismo forma parte de la contabilización del agua controlada el disponer de medidores en las plantas de producción y puntos de aporte al sistema de distribución.

### **Consumo Autorizado Facturado Qaf**

Corresponde al volumen de agua que se entrega y se factura al cliente exitosamente, el cual genera ingresos económicos para la empresa de agua.

Para su determinación es necesario identificar a todos los clientes registrados en los registros de facturación (hogares, comercios y consumidores industriales, etc.).

Se calcula como la suma de los siguientes componentes definidas en las siguientes secciones:

- Agua exportada (B)
- Consumo doméstico facturado medido (C)
- Consumo no doméstico facturado medido (D)
- Consumo doméstico facturado no medido (E)
- Consumo no doméstico facturado no medido (F)

$$Cf = Cdf_1 + Cndf_1 + Cdf_2 + Cndf_2 \quad \text{Ec. 4:1}$$

### **Consumo Autorizado No facturado**

Corresponde a consumos que son permitidos y avalados por la Empresa a agentes externos pero que no son facturados por encontrarse bajo un régimen especial definido por la Empresa. Dentro de la EAAB E.S.P se encuentra definida la política de que todo consumo debe ser facturado, a excepción de los consumo realizados por la empresa para su funcionamiento y aquellos que se requieran en emergencias tales como los realizados por el cuerpo de bombeos. Su determinación se calcula con la suma de los siguientes componentes, medidos y no medidos, anteriormente definidos:

- Consumo doméstico no facturado medido (H)

- Consumo no doméstico no facturado medido (I)
- Usuarios autorizados no facturados medidos (J)
- Consumo doméstico no facturado no medido (K)
- Consumo no doméstico no medido no facturado (L)
- Usuarios autorizados no facturados no medidos (M)
- Agua utilizada por la empresa de agua (N)

Este es un consumo que aunque es autorizado por la empresa no representa ingresos monetarios, razón por la cual se le presta mucha atención a su control.

$$Cnf = Cdnf_1 + Cdnf_2 + Cndnf_1 + Cndnf_2 + Canf_1 + Canf_2 \quad \text{Ec. 4:2}$$

### **Consumo Autorizado**

Corresponde al volumen de agua medida y/o no medida tomada por los clientes registrados, la empresa de agua y otras partes autorizadas, tanto medido como no medido, es decir, los consumos anteriormente descritos.

Su cálculo corresponde a la suma entre:

- Consumo Autorizado Facturado Qaf (G)
- Consumo Autorizado No facturado Qanf (O)

$$Va = Cf + Cnf + Ce_1 \quad \text{Ec. 4:3}$$

### **Pérdidas Comerciales**

También conocidas como pérdidas aparentes. Corresponden al consumo no autorizado, consumo legal no facturable y errores de micromedición, es decir, la suma de los siguientes componentes:

- Consumo a través de conexiones ilegales (Q)
- Consumo a través de medidores rotos y puenteados (R )
- Pérdida de agua por errores de manejo de información (S)

$$Vpc = Cil_2 + Cfr_2 + Err \quad \text{Ec. 4:4}$$

Su estimación no es sencilla y requiere de continuos monitoreos de campo y estudios de identificación para lograr su determinación lo más cercano posible a la realidad.

### **Pérdidas de agua**

Corresponde al volumen de agua perdida entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a varias razones, consumo clandestinos que se conectan a la tubería ilegalmente, fugas visibles, semivisibles y no visibles en las tuberías viejas, alteraciones en los medidores, etc. Se puede expresar como la diferencia entre el volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado y se puede desagregar en pérdidas aparentes y reales.

Las pérdidas totales de agua  $Q_p$  se pueden derivar luego de  $Q_i - Q_a$ .

$$V_p = V_{pr3} + V_{pc} \quad \text{Ec. 4:5}$$

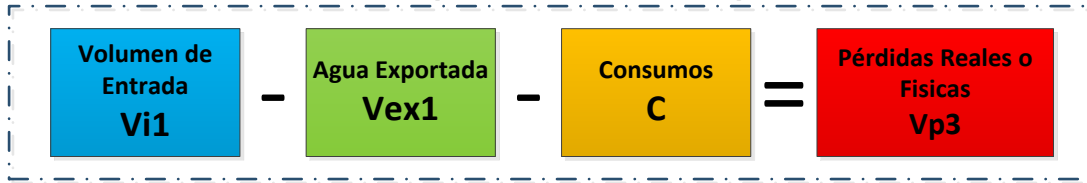
### **Pérdidas Técnicas**

Se denominan pérdidas técnicas o pérdidas reales. Constituyen las fugas desde tuberías de transmisión y distribución, fugas desde conexiones de servicio y fugas desde tanques de almacenamiento.

Corresponden a aquellas debidas a fugas por fallas en los elementos de la red, tales como conductos, conexiones y tanques de almacenamiento. Y representan el principal objetivo del cálculo del balance hídrico cuando se trata de identificar zonas con mayores índices de pérdidas de agua reales a los cuales dirigir planes de acción para recuperar recursos físicos y monetarios.

El siguiente esquema presenta el principal objetivo del cálculo del balance hídrico desagregado. Para conocer las pérdidas reales del sistema es necesario conocer el volumen de entrada a la unidad hidráulica estudiada, el volumen de agua exportado para descontárselo al de entrada y los consumos tanto autorizados como no autorizados para deducirlos y así conocer el verdadero valor de agua que no llega a ningún usuario final y termina perdiéndose.

**Ilustración 4-3 – Esquema determinación pérdidas reales**



A continuación la secuencia de cálculos necesarios para determinar las pérdidas reales, conocidos el volumen de entrada y exportado y los consumos autorizados y no autorizados reducidos al mínimo número de componentes:

$$C = Va + Vpc \quad \text{Ec. 4:6}$$

$$C = Cf + Cnf + Ce_1 + Cil_2 + Cfr_2 + Err \quad \text{Ec. 4:7}$$

$$C = Cdf_1 + Cndf_1 + Cdf_2 + Cndf_{2_1} + Cndnf_1 + Cndnf_2 + Canf_1 + Canf_2 + Ce_1 + Cil_2 + Cfr_2 + Err \quad \text{Ec. 4:8}$$

$$Vpr_3 = Vp - Vpc \quad \text{Ec. 4:9}$$

$$Vp = Vi_1 - Vex_1 - Va \quad \text{Ec. 4:10}$$

$$Vpr_3 = Vi_1 - Vex_1 - Va - Vpc \quad \text{Ec. 4:11}$$

$$C = Va + Vpc \quad \text{Ec. 4:12}$$

$$Vpr_3 = Vi_1 - Vex_1 - C \quad \text{Ec. 4:13}$$

$$Vpr_3 = Vi_1 - Vex_1 - (Cf + Cnf + Ce_1 + Cil_2 + Cfr_2 + Err) \quad \text{Ec. 4:14}$$

$$Vpr_3 = Vi_1 - Vex_1 - Cdf_1 - Cndf_1 - Cdf_2 - Cndf_2 - Cndnf_1 - Cndnf_2 - \dots \\ \dots Canf_1 - Canf_2 - Ce_1 - Cil_2 - Cfr_2 - Err \quad \text{Ec. 4:15}$$

### 4.1.1 Volumen de entrada al Sistema Vi<sub>1</sub>

Dentro de los puntos claves en la evaluación de la gestión que se efectúa en cada una de la zonas de servicio se encuentra el índice de agua no contabilizada de cada uno de los sectores hidráulicos que la componen, que para su evaluación requiere como datos de entrada los valores de los volúmenes de agua micromedidos a través de cada uno de los medidores con que cuentan los usuarios en su predio y los volúmenes macromedidos a

través de los equipos instalados en las redes matrices de alimentación de los sectores hidráulicos.

Uno de los métodos para calcular el volumen total *neto producido* y entregado a todas las gerencias de zona, es con la suma de los resultados de los balances hidráulicos de cada uno de los sectores, medidos con los 87 macromedidores materializados el cual miden la entrada o salida del agua según sea el caso, menos los consumos técnicos zonas, los cuales hacen referencia a los volúmenes de agua de las zonas utilizados en: lavados por hidrantes, daños presentados en la Red Matriz, incluyendo el volumen necesario desaguado para la reparación, suministro de agua a carrotanques empleados por Red Matriz como producto de sus actividades propias y lavado de tanques de almacenamiento, y más o menos los deltas de volúmenes de tanques, el cual hace referencia al volumen de agua que debería haber o que hay de más en los tanques de almacenamiento de un sector los cuales se ubican después de los macromedidores que lo miden al corte del mes.

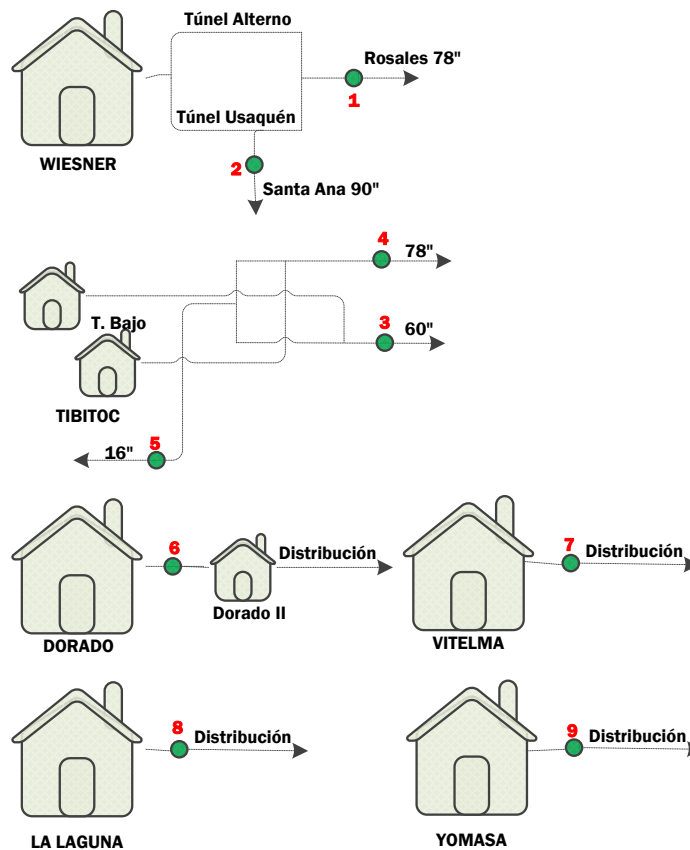
El segundo método para calcular el volumen total neto producido y entregado a todas las gerencias de zona, es sumando las mediciones registradas de los cinco macromedidores de la Zona 10 (los cuales se relacionan más adelante) y los puntos de medición que pertenecen a las salidas de las plantas de tratamiento de El Dorado, Vitelma, La Laguna y Yomasa y restando tanto los consumos de los municipios cargados a la red del acueducto de la ciudad de Bogotá (menos La Calera), como los consumos técnicos de toda Bogotá que se reportan mes a mes para cada una de las gerencias de zona y para red matriz y menos o más los deltas de volúmenes de tanques de Bogotá que resultan de la diferencia de lo que hay al inicio del mes en los tanque de almacenamiento con lo que queda al final del mes.

Es importante recalcar que los puntos de medición los cuales conforman la Zona 10 y que son relacionados en los ítems del 1 al 5 en la tabla que sigue a continuación, son diferentes a los 87 macromedidores presentados en la Tabla 2, los cuales miden hasta un nivel de sector hidráulico.

**Tabla 4.1 – Puntos de medición de volumen producido total bruto por la EAAB E.S.P Zona 10**

MEDIDOR	PLANTA	UBICACIÓN
1	Wiesner	Rosales
2	Wiesner	Santa Ana
3	Tibitoc	Tibitoc 60"
4	Tibitoc	Tibitoc 78"
5	Tibitoc	Tibitoc 16"
6	El Dorado	Salida PTAP Dorado
7	Vitelma	Salida PTAP Vitelma
8	La Laguna	Salida PTAP Laguna
9	Yomasa	Salida PTAP Yomasa

**Ilustración 4-4 - Puntos de medición de volumen producido total bruto por la EAAB E.S.P Zona 10**



El volumen de entrada a todo el sistema de acueducto de Bogotá es el volumen de agua que sale de las plantas de tratamiento hacia la red de distribución. corresponde a la diferencia entre el volumen de entrada a las Plantas y el volumen gastado en ellas. El volumen producido se macromide a la salida de los almacenamientos de las Plantas de Tratamiento, en las tuberías que de la Planta conducen a la red de distribución.

El volumen de entrada de agua a cualquier otra unidad hidráulica definida dentro de la sectorización, ya sea sector, subsector o distritos, se determina con base en los datos de los macromedidores instalados en las tuberías de entrada a la unidad hidráulica para la cual se quiere hacer el balance hídrico. La EAAB E.S.P dentro de sus protocolos tiene definidos los cálculos con base a los procedimientos definidos en el diagrama de flujo de Ilustración 3-6 con base en archivos con esquema similar como el siguiente:

**Tabla 4.2 – Esquema caudales horarios macromedidos**

		Hora <i>i</i>									
Día <i>j</i>	Fecha	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	...	22:30	23:00	23:30	$Q_{prom\_diario}$
	01/01/2010	→									
	02/01/2010	$Q_{horario}$									
	03/01/2010										
	...										
	30/01/2010										
	31/01/2010										
											$Q_{prom\_mes}$

De acuerdo con lo anterior si se desea conocer el volumen de entrada que circula por una tubería que tenga instalado un macromedidor debe realizar los siguientes cálculos:

Se calcula el caudal promedio diario,

$$Q_{prom\_diario} = \frac{\sum_{i=1}^{48} Q_{horario-j}}{48} \quad \text{Ec. 4:16}$$

Contando con los caudales promedios diarios de cada uno de los días del mes, se calcula el caudal promedio mensual:

$$Q_{prom\_mes} = \frac{\sum_{i=1}^{No.días\ mes} Q_{prom\_diario}}{No.días\ mes} \quad \text{Ec. 4:17}$$

El caudal promedio mensual se transforma en volumen:

$$Vi_1(m^3) = Q_{prom\_mes} \times \frac{24\text{ horas} \times 3600\text{ segundos}}{1000} \quad \text{Ec. 4:18}$$

Resumiendo los pasos anteriores se obtiene que el cálculo del volumen de entrada mensual que pasa por cualquier tubería donde se tenga instalado un macromedidor es:

$$Vi_1(m^3) = \frac{\sum_{i=1}^{No.días\ mes} \sum_{j=1}^{48} Q_{horario,i,j}}{48} \times \frac{86400}{1000} \quad \text{Ec. 4:19}$$

$$V_{i1(m^3)} = \frac{\sum_{i=1}^{No.días\ mes} \sum_{j=1}^{48} Q_{horario\ ij}}{48} \times 86.4 \quad Ec. 4:20$$

Si se deseara calcular el volumen de entrada a cualquier unidad hidráulica se debe establecer el número de entradas de agua al sistema, calcular el volumen mensual y sumar los volúmenes de cada una de las entradas para establecer el volumen total de entrada.

Una mejor forma de entender y realizar el cálculo del volumen de entrada a cualquier unidad hidráulica que cuente con caudales horarios medidos cada cierto  $\Delta t$  es por medio de la determinación del área bajo la curva de la curva de caudal. Es decir:

$$V_i(m3) = \frac{24h}{0.5} \times \frac{3600s}{1h} \times \frac{1}{1000} \times \sum_{i=1}^{No.días\ mes} \sum_{j=1}^{48} Q_{i,j} \quad Ec. 4:21$$

**Ilustración 4-5 – Cálculo del volumen de entrada –área bajo la curva**

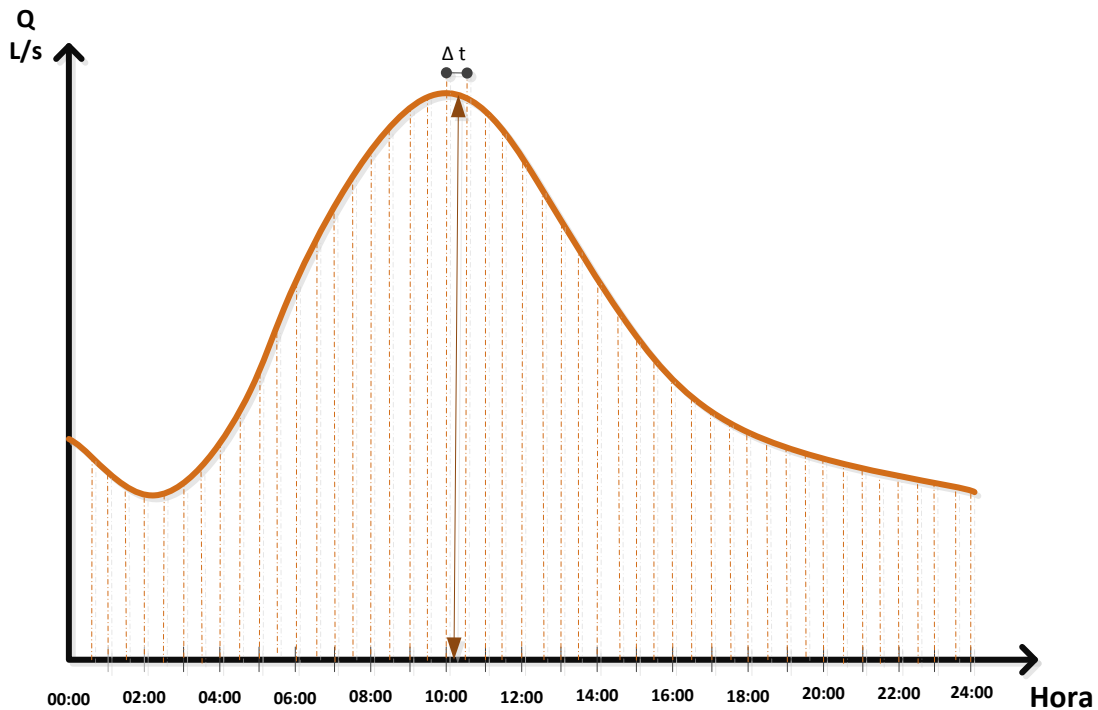




Tabla 4.3 – Variables y constantes Volumen de agua de entrada  $V_{i1}$ 

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Q_{\text{horario}_j}$	Caudal medido directamente por el macromedidor. Caudal bruto.	L/s	Dato reportado por el macromedidor cada media hora.	Macromedición
2	$Q_{\text{prom\_diario}}$	Caudal promedio diario.	L/s	Corresponde al promedio de los 48 caudales horarios reportados durante un día cada media hora por el macromedidor.	Macromedición
3	$Q_{\text{prom\_mes}}$	Caudal promedio mensual	L/s	Corresponde a la sumatoria de los caudales promedios diarios dividido entre el número de días del mes en estudio.	Macromedición
4	$Q_{\text{horario}_{i,j}}$	Caudal medido el día $i$ a la hora $j$	L/s	Son datos reportados directamente del macromedidor.	Macromedición
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	48	Número de datos reportados por el macromedidor diariamente.	#	2 datos x 24 horas = 48 datos/día	N/A
2	No. días mes	Número de días del mes	#	Número de días del mes del que se está calculando el volumen de suministro.	N/A
3	86.4	Factor de conversión de caudal a volumen	sin	Factor para convertir L/s a m <sup>3</sup> . 60 seg x 60 min x 24 horas / 1000 L	N/A

#### 4.1.2 Volumen de agua exportada $V_{\text{exp}1}$

Corresponde a aquellos volúmenes de agua que no ingresan al sistema de distribución principal sino que son suministrados a otros sistemas independientes de los cuales no se tiene control a partir del punto de suministro.

La cuantificación del volumen de agua exportada se determina a partir de mediciones registradas en los medidores ubicados en el punto de suministro al sistema externo. Con base en estas mediciones es con las que generalmente se realiza la facturación o venta de agua a estos sistemas externos. En vista de que su medición se realiza con macromedidores de igual forma que el volumen de entrada su cálculo es similar:

$$Q_{\text{prom\_diario}} = \frac{\sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_i}}{48} \quad \text{Ec. 4:22}$$

$$Q_{\text{prom\_mes}} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{No.días mes}} Q_{\text{prom\_diario}}}{\text{No.días mes}} \quad \text{Ec. 4:23}$$

$$V_{\text{exp1(m}^3)} = Q_{\text{prom\_mes}} \times 24 \text{ horas} \times 3600 \text{ segundos} \quad \text{Ec. 4:24}$$

$$V_{\text{exp1(m}^3)} = \frac{\sum_{j=1}^{\text{No.días mes}} \frac{\sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{i,j}}}{48}}{\text{No.días mes}} \times \frac{86400}{1000} \quad \text{Ec. 4:25}$$

$$V_{\text{exp1(m}^3)} = \frac{\sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{i,j}}}{48 \times \text{No.días mes}} \times 86.4 \quad \text{Ec. 4:26}$$

**Tabla 4.4 – Variables y constantes Volumen de agua exportada  $V_{\text{exp1}}$**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Q_{\text{horario}_j}$	Caudal medido directamente por el macromedidor. Caudal bruto.	L/s	Dato reportado por el macromedidor cada media hora.	Macromedición
2	$Q_{\text{prom\_diario}}$	Caudal promedio diario.	L/s	Corresponde al promedio de los 48 caudales horarios reportados durante un día cada media hora por el macromedidor.	Macromedición
3	$Q_{\text{prom\_mes}}$	Caudal promedio mensual	L/s	Corresponde a la suma de los caudales promedios diarios dividido entre el número de días del mes en estudio.	Macromedición
4	$Q_{\text{horario}_{i,j}}$	Caudal medido el día i a la hora j	L/s	Son datos reportados directamente del macromedidor.	Macromedición
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	48	Número de datos reportados por el macromedidor diariamente.	#	2 datos x 24 horas = 48 datos/día	N/A
2	No.días mes	Número de días del mes	#	Número de días del mes del que se está calculando el volumen de salida.	N/A
3	86.4	Factor de conversión de caudal a volumen	sin	Factor para convertir L/s a m3. 60 seg x 60 min x 24 horas / 1000 L	N/A

### 4.1.3 Consumos

#### Consumo doméstico facturado medido Cdf<sub>1</sub>

Corresponde al volumen de agua que se entrega y se factura al cliente exitosamente, el cual genera ingresos económicos para la empresa. Para su determinación es necesario identificar a todos los clientes registrados en los registros de facturación (hogares, comercios y consumidores industriales, etc.).

En la EAAB E.S.P la facturación se realiza con base a ciclos espaciales de facturación, los cuales comprenden usuarios residenciales y no residenciales, entre los que se cuentan: comerciales, industriales, mixtos, especiales y oficiales a los que se les factura conforme a la lectura, crítica y verificación de consumos micromedidos por rutas definidas en la geografía de la localidad conocidas como vigencias. Cada vigencia corresponde a la toma de lecturas de volumen acumulado en cada uno de los micromedidores de una ruta geográfica de lectura. Las lecturas de una sola vigencia tardar entre 1 y 2 días y se realizan cada dos meses para el volumen doméstico facturado. Dentro de la EAAB E.S.P se ha logrado hacer coincidir los límites geográficos de las vigencias con los límites geográficos de los sectores hidráulicos, por lo que la suma de varias vigencias corresponde a un sector hidráulico.

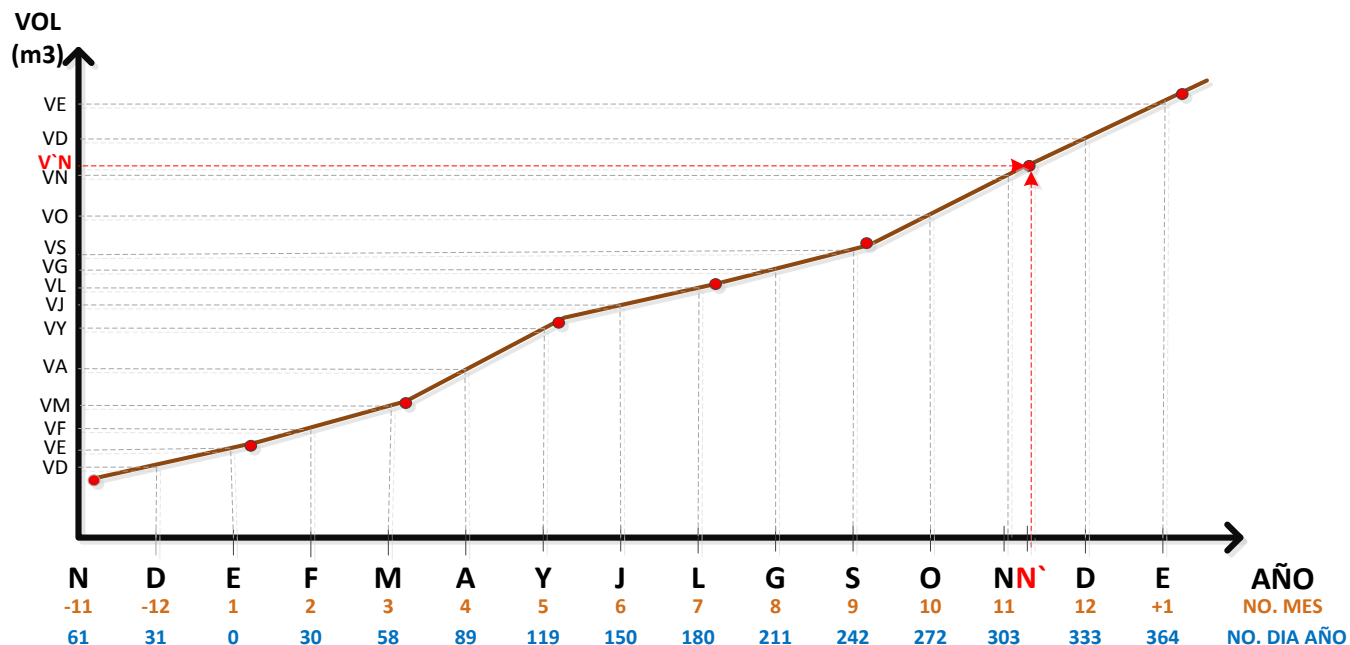
$$Cdf_{1(i,i+1)} = V_{a(i,i+1)} + V_{b(i,i+1)} + \dots + V_{x(i,i+1)} \quad \text{Ec. 4:27}$$

$$Cdf_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{v(i,i+1)} \quad \text{Ec. 4:28}$$

La EAAB E.S.P utiliza los registros de facturación tomados de todo el grupo de vigencias cada dos meses y los anualiza con base en un prorrateo. Este procedimiento no ha logrado establecer un consumo mensual por lo que el presente trabajo de investigación propone y utiliza los procedimiento de interpolación siguientes para establecer volúmenes mensuales y de esta forma ser comparados con los volúmenes de entrada o macromedidos.

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos medidos facturados a partir de los registros de los micromedidores o registro de red.

Ilustración 4-6 – Ciclos de Facturación volúmenes micromedidos



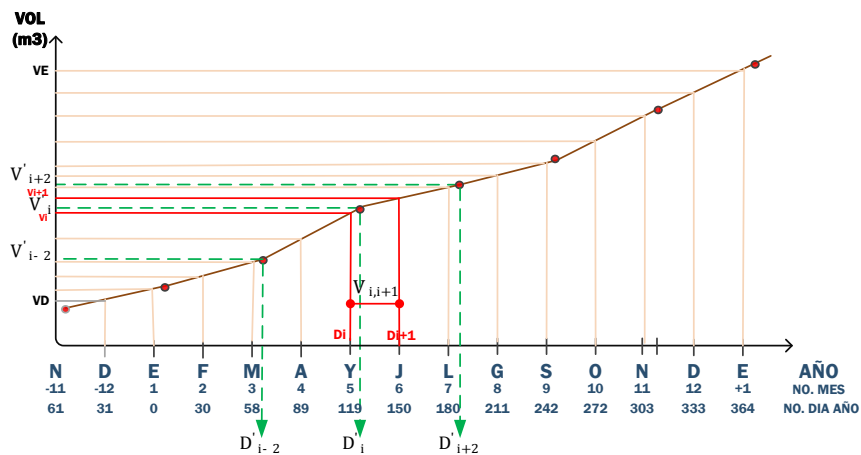
Volumen para meses donde hay una toma de lectura de facturación durante el mes en consideración i:

$$V_{(i,i+1)} = \left( \frac{V'_{i+2} - V'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right) (D_{i+1} - D'_i) + V'_i - \left( \frac{V'_i - V'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} \right) (D_i + D'_{i-2}) - V'_{i-2} \quad \text{Ec. 4:29}$$

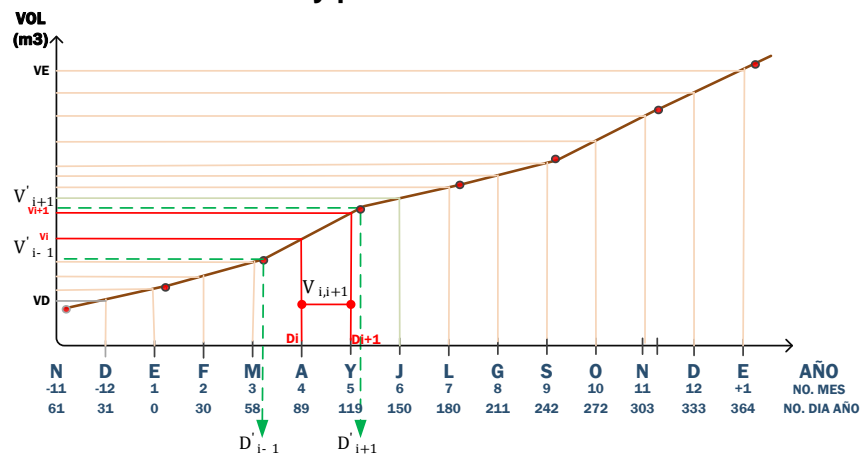
Volumen para meses donde hay una toma de lectura antes del inicio del mes considerado i y una lectura posterior al mes i+1 considerado:

$$V_{(i,i+1)} = \left( \frac{V'_{i+1} - V'_{i-1}}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right) (D_{i+1} - D_i) - V'_{i-1} \quad \text{Ec. 4:30}$$

**Ilustración 4-7 – Ciclos de Facturación para lecturas realizadas el mismo mes en consideración**



**Ilustración 4-8 – Ciclos de Facturación para volúmenes con lecturas anteriores y posteriores al mes en consideración**



**Tabla 4.5 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado  $Cdf_1$**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$V_{(i,i+1)}$	Volumen a calcular durante el mes i. i+1 corresponde al inicio del siguiente mes, pero el volumen es calculado un día antes de iniciar el mes siguiente.	m3	Calculado por interpolación de lecturas anteriores y posteriores al inicio y finalización del mes i.	Calculado por interpolación
2	$V'_{i+2}$	Sumatoria de volúmenes de facturación domésticos tomados la siguiente vigencia después de finalizado el periodo en consideración i.	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado ante la EAAB de acuerdo a una ruta de lectura o vigencia.	Registro manual Micromedición
3	$V'_i$	Sumatoria de volúmenes de facturación domésticos tomados durante el mismo periodo en consideración i.	m3		Registro manual Micromedición
4	$V'_{i-2}$	Sumatoria de volúmenes de facturación domésticos tomados la vigencia anterior antes de iniciar el periodo en consideración i.	m3		Registro manual Micromedición
5	$V'_{i+1}$	Sumatoria de volúmenes de facturación domésticos tomados en la misma vigencia después de finalizado el periodo en consideración i.	m3		Registro manual Micromedición
6	$V'_{i-1}$	Sumatoria de volúmenes de facturación domésticos tomados en la misma vigencia antes de iniciar el periodo en consideración i.	m3		Registro manual Micromedición
7	$V_{v(i,i+1)}$	Volumen doméstico calculado para el mes i correspondiente a la misma vigencia v	m3		Corresponde al mismo $V_{(i,i+1)}$ pero para diferentes vigencias v
8	$Cdf_{1(i,i+1)}$	Consumo doméstico facturado medido el mes i	m3	Corresponde a la suma de los volúmenes de todas las vigencias que conforman la unidad hidráulica o sector en estudio.	Calculado
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$D'_{i+2}$	Día del año en que se tomaron las lecturas de los volúmenes $V'_{i+2}$	#	Registro de datos realizado por el operador el día que realizó la lectura.	Registro electrónico
2	$D'_i$	Día del año en que se tomaron las lecturas de los volúmenes $V'_i$	#		
3	$D'_{i-2}$	Día del año en que se tomaron las lecturas de los volúmenes $V'_{i-2}$	#		
4	$D_i$	Día del año en que inicia el periodo considerado. Primer día del mes.	#	Periodo en el que se está interesado en calcular el volumen facturado.	Registro electrónico
5	$D_{i+1}$	Día del año en que finaliza el periodo considerado. Último día del mes.	#		

**Consumo no doméstico facturado medido  $Cndf_1$** 

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos medidos facturados a partir de los registros de los medidores o registro de red. La EAAB E.S.P toma lecturas bimensuales de consumo no domesticos con consumos dentro de rangos no muy altos y para aquellos grandes consumidores definidos como aquellos que facturen a partir de 1000 m<sup>3</sup> mensuales durante seis meses consecutivos (RESOLUCIÓN No. CRA – 138 DE 2000, Artículo 3º) las lecturas de consumos y por tanto la facturación es mensual.

$$Cndf_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{v(i,i+1)} \quad \text{Ec. 4:31}$$

$$V_{(i,i+1)} = \left( \frac{V'_{i+1} - V'_{i-1}}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right) (D_{i+1} - D_i) - V'_{i-1} \quad \text{Ec. 4:32}$$

**Tabla 4.6 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado  $Cdf_1$** 

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	i	Número del mes para el cual se quiere conocer el volumen no doméstico medido	#	N/A	N/A
2	$V_{v(i,i+1)}$	Volumen calculado para el mes i correspondiente a la misma vigencia v	m3	Corresponde al mismo $V_{(i,i+1)}$ pero para diferentes vigencias v	Calculado
3	$V'_{i+1}$	Sumatoria de volúmenes de facturación no domésticos tomados en la misma vigencia después de finalizado el periodo en consideración i.	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado ante la EAAB de acuerdo a una ruta de lectura o vigencia.	Registro manual Micromedición
4	$V'_{i-1}$	Sumatoria de volúmenes de facturación no domésticos tomados en la misma vigencia antes de iniciar el periodo en consideración i.	m3		
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$No.vig\_SH$	Número de vigencias sector hidráulico	#	Número de vigencias que componen la unidad hidráulica o el sector hidráulico en estudio.	Zonas comerciales
2	$D_i$	Día exacto del año en que inicia el periodo considerado. Primer día del mes.	#	Periodo en el que se está interesado en calcular el volumen facturado.	Registro electrónico
3	$D_{i+1}$	Día exacto del año en que finaliza el periodo considerado. Último día del mes.	#		

**Consumo doméstico facturado no medido Cdf<sub>2</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos o de uso residencial no medidos facturados. No medidos por diferentes razones, entre ellas consumos realizados por los usuarios en proceso de normalización (Inclusión en la base de datos de suscriptores) a los que no se les haya podido aplicar el cobro con macromedidores de frontera o mediante la instalación de micromedidores alquilados y que por ello no tengan aparato de medición. En este grupo se incluyen usuarios con facturación provisional o para el caso del acueducto de Bogotá, *Ciclo I*: Son aquellos cuyas condiciones operacionales y técnicas de suministro (ausencia de redes locales, o servicio discontinuo) no garantizan la prestación del servicio con la continuidad y presión requeridas según los parámetros de calidad del servicio del prestador. También se incluyen usuarios que se localizan en zonas de afectación vial o rondas de cursos de agua y que en general no han formalizado su legalidad y propiedad ante el municipio. [3]

En la mayoría de empresas este valor se estima con base en el consumo promedio de otros suscriptores del mismo estrato socioeconómico, medidos con instrumentos, durante los últimos tres períodos de facturación. Sin embargo se recomienda hacer un estimado más apropiado para los clientes facturados sin medidores de agua. No se recomienda simplemente asignar cifras de consumo de usuarios medidos porque las tarifas medidas usualmente crean comportamientos de consumo diferentes que las tarifas planas. Por lo tanto, se debe determinar el consumo doméstico no medido promedio utilizando monitoreos individuales de usuarios (MIU) para una muestra al azar de usuarios. Un método alternativo es usar monitoreos de zona (MZ) si el área en investigación no está sujeta a grandes volúmenes de fugas no detectadas.

Cuando se realizan monitoreos zonales o individuales puede establecerse el consumo anual no facturado a suscriptores en Ciclo I (suscriptores sin medidor facturados con un consumo presuntivo) en cada sector hidráulico con base en la siguiente ecuación:

$$Cdf_2 = N_{\text{sus\_ciclo\_I}} \times (V_{\text{sum\_promedio}} \times (1 - IANCRNO) - ICUF_{\text{Ciclo\_I}}) \quad \text{Ec. 4:33}$$

$$V_{\text{sum\_promedio}} = \frac{V_{\text{sum\_mensual}}}{N_{\text{sus\_ciclo\_I}}} \quad \text{Ec. 4:34}$$

$$IANCRNO = \frac{Q_{\text{min\_noct}}}{Q_{\text{Max\_Diario}}} \quad \text{Ec. 4:35}$$



$$ICUF_{Ciclo-I} = ICUF_{sector} = \frac{Cf}{N_f} = \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{N_f} \quad \text{Ec. 4:36}$$

$$Cdf_2 = N_{sus\_ciclo-I} \times \left( \frac{V_{sum\_mensual}}{N_{sus\_ciclo-I}} \times \left( 1 - \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right) - \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{N_f} \right) \quad \text{Ec. 4:37}$$

$$Cdf_2 = N_{sus\_ciclo-I} \times \left( \frac{\frac{\sum_{j=1}^{No.días\ me} \sum_{i=1}^{48} Q_{horario_{i,j}} \times 86.4}{48}}{N_{sus\_ciclo-I}} \times \left( 1 - \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right) - \frac{\sum_{v=1}^{No.vig.SH} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{No.vig.SH} V_{nd_{v(i,i+1)}}}{N_f} \right) \quad \text{Ec. 4:38}$$

**Tabla 4.7 – Variables y constantes Consumo doméstico facturado no medido Cdf<sub>2</sub>**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$V_{sum\_promedio}$	Volumen mensual promedio por suscriptor suministrado a barrios ciclo I	m3/suscip/mes	Determinación de volúmenes suministrados a barrios ciclo I a partir de lectura de macromedidores; la variable se calcula como el cociente entre el volumen promedio suministrado y el número de usuarios del Ciclo I	Macromedición en el punto o los puntos de suministro de agua a barrios Ciclo I.
2	$Q_{prom\_mensual}$	Caudal promedio mensual suministrado a barrios Ciclo I	m3/mes	Sumatoria de mediciones directas de caudales horarios $Q_{horario_{i,j}}$ por lo menos durante un año	Macromedición
2	$Q_{min\_noct}$	Caudal mínimo nocturno	m3/s	Medición continua del caudal registrado en la zona de estudio entre 2 y 4 am.	Este método se basa en el supuesto de que el consumo autorizado cae a un mínimo durante las horas nocturnas (usualmente entre las 2 y las 4 am). Por lo tanto, las pérdidas reales o el índice de agua no contabilizada representan el porcentaje máximo del flujo.
3	$Q_{Max\_Diario}$	Caudal máximo diario suministrado	m3/s	Máximo caudal registrado durante el día en la zona de estudio resultado de mediciones continuas.	
4	$IANC_{RNO}$	Índice de Pérdidas Técnicas de Redes No Oficiales	%	Medición del caudal mínimo nocturno y del caudal máximo diario. El IANC de redes no oficiales se determina como el cociente entre la medición nocturna (fugas o pérdidas técnicas) y el caudal promedio.	
5	$ICUF_{Ciclo-I}$	Consumo facturado promedio por suscriptor en cada sector hidráulico	m3/suscip/mes	Corresponde al consumo promedio por usuario facturado del mismo sector pero para usuarios con un nivel socioeconómico similar o condiciones de vida similares.	Micromedición

6	$\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)}$	Sumatoria de volúmenes domésticos para el número de vigencias que conforman el sector hidráulico en estudio con el mismo nivel socioeconómico del barrio i estudiado.	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado ante la EAAB de acuerdo a una ruta de lectura o vigencia	
7	$\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)}$	Sumatoria de volúmenes no domésticos para el número de vigencias que conforman el sector hidráulico en estudio con el mismo nivel socioeconómico del barrio i estudiado.	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado ante la EAAB de acuerdo a una ruta de lectura o vigencia	
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$N_{sus\_ciclo\_I}$	Número de suscriptores en Ciclo I en la unidad hidráulica o sector hidráulico estudiado	#	Son usuarios registrados por iniciativa propia ante la EAAB E.S.P como consumidores de agua suministrada por la empresa pero con la intención de que su predio sea legalizado y por tanto el servicio prestado.	Bases de datos EAAB
2	86.4	Factor de conversión de caudal a volumen	sin	Factor para convertir L/s a m3. 60 seg x 60 min x 24 horas / 1000 L	N/A

**Consumo no doméstico facturado no medido Cndf<sub>2</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos (predios de uso industrial, comercial, etc.) no medidos pero facturados. La determinación de estos consumos se establece con base en aforos individuales que realice la Empresa, utilizando los promedios de consumo, medidos con instrumentos, de predios de actividad económica similar, durante los últimos tres períodos de facturación, o en su defecto utilizando tablas de cálculo de consumos establecidas para tal fin. El consumo total no doméstico facturado no medido es igual a la suma de los consumos individuales facturados dentro de la unidad hidráulica o sector hidráulico estudiado.

$$Cndf_2 = \sum Vnd_i \quad \text{Ec. 4:39}$$

$$Vnd_i = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad \text{Ec. 4:40}$$

**Tabla 4.8 – Variables y constantes Consumo no doméstico facturado no medido Cndf\_2**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Vnd_i$	Consumos individuales estimados por promedios facturados a predios similares que cuentan con registros de volumen o micromedición	m3	Promedio de los últimos tres meses de facturación de predios dedicados a actividades económicas similares con Micromedición.	Bases de datos EAAB E.S.P
2	$V_1, V_2, V_3$	Consumos de predios de actividad económica similar a la de estudio de los últimos tres meses.	m3	Medición directa	Registro manual Micromedición

**Consumo doméstico no facturado medido Cdnf<sub>1</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos medidos pero no facturados. Su cuantificación se realiza con base en registros de medición para cada usuario. Su consumo total se realiza con base en la suma de los registros individuales de cada uno de los usuarios domésticos medidos. No es común este tipo de casos en la EAAB E.S.P puesto que una de sus políticas es que todo consumo medido debe ser facturado, a menos que sean consumos realizados por la misma empresa para su funcionamiento.

$$Cdnf_1 = \sum Vd_i \quad \text{Ec. 4:41}$$

**Tabla 4.9 – Variables y constantes Consumo doméstico no facturado medido Cdnf\_1**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Vd_i$	Volúmenes domésticos micromedidos	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado pero sin ser facturados.	Registro manual Micromedición

**Consumo no doméstico no facturado medido Cndnf<sub>1</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios no domésticos no facturados pero medidos, por ejemplo edificios municipales con cobro especial. Al igual que Cdnf<sub>1</sub> su cuantificación se realiza con base en la sumatoria de los registros individuales de medición de cada uno de los usuarios no domésticos que están bajo este régimen de no cobro y a los que se les esté registrando su consumo.

$$Cndnf_1 = \sum Vnd_i \quad \text{Ec. 4:42}$$

**Tabla 4.10 – Variables y constantes Consumo no doméstico no facturado medido Cndnf\_1**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Vnd_i$	Volúmenes no domésticos micromedidos	m3	Son datos leídos directamente por un operador en el micromedidor de cada cuenta contrato o predio con servicio de acueducto legalizado no doméstico con un régimen especial que hace que no sean facturados.	Registro manual Micromedición

**Usuarios autorizados no facturados medidos Canf<sub>1</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios autorizados medidos y no facturados, por ejemplo usuarios en zonas de afectación, en emergencias e hidrantes. Se diferencian de  $Cdnf_1$  y  $Cndnf_1$  en que no son claramente de naturaleza doméstica o no doméstica pero su cuantificación se realiza al igual que estos con base en registros de medición para cada usuario autorizado.

$$Canf_1 = \sum Va_i \quad \text{Ec. 4:43}$$

**Tabla 4.11 – Variables y constantes Usuarios autorizados no facturados medidos Canf\_1**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Va_i$	Volúmenes autorizado	m3	<p>Son datos micromedidos o macromedidos dependiendo de la naturaleza del usuario autorizado. Para consumos grandes se realiza por medio de macromedición continua y su estimación se realiza con base en el proceso de tratamiento de la información para datos macromedidos (Ver volúmenes de entrada)</p> <p>Para consumos pequeños y cortos basta con realizar mediciones puntuales ya sea con micromedidores o instrumentos de medición apropiados para esto, para lo cual es importante tener en cuenta su precisión, ya que dependiendo del método escogido será mayor o menor la incertidumbre de los volúmenes medidos.</p>	Macromedición/ Micromedición

**Consumo doméstico no facturado no medido Cdnf<sub>2</sub>**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos no medidos y no facturados. Entre ellos se encuentra: Consumo no facturado a suscriptores sin medidor localizados en barrios no legalizados que consumen más agua que el consumo presuntivo con que se facturen y conjuntos habitacionales con cuentas comunales sin facturación. Para la determinación de este último se toman conjuntos con

50 hogares o más y se confirma con base en mediciones aleatorias a la entrada (totalizadoras) de una muestra representativa de conjuntos en comparación con la sumatoria de micromedidores individuales de los hogares si hay consumos sin facturar. Su estimación se realiza con base en monitoreos individuales de usuarios (MIU) o monitoreos zonales (MZ). Luego de los monitoreos y mediciones temporales de confirmación se aplica la siguiente ecuación:

$$Cdnf_2 = N_{CH>5} \times ICUF \times f_e \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:44}$$

$$Cdnf_2 = N_{CH>5} \times \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{N_{ac}} \times \frac{N_{CE}}{N_{CH>5}} \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:45}$$

$$Cdnf_2 = \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{N_f} \times N_{CE} \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:46}$$

$$Cdnf_2 = \frac{\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} v d_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} v n d_{v(i,i+1)_1}}{N_{f_d} + N_{f_{nd}}} \times N_{CE} \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:47}$$

**Tabla 4.12 – Variables y constantes Consumo doméstico no facturado no medido Cdnf\_2**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	ICUF	Índice de consumo promedio por usuario de cada sector hidráulico	m3/suscp/mes	Sumatoria de consumos domésticos y no domésticos facturados para el mes en estudio dividido entre el número total de facturas de las vigencias que conforman la unidad hidráulica en estudio.	Micromedición
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$N_{CH>5}$	Número de conjuntos habitacionales en cada sector hidráulico con más de 5 puntos de consumo sin una cuenta de servicios generales.	#	Su identificación se realiza con la ayuda del sistema de información geográfica y la base de datos de la empresa de los conjuntos habitacionales con más de 5 puntos de consumo sin una cuenta de servicios generales.	SIG y Bases de datos
2	$f_e$	Factor de éxito: Proporción de conjuntos habitacionales sin cuenta de servicios generales en los que se confirma (se puede esperar) que	Sin	Realización de inspecciones a una muestra de conjuntos habitacionales sin cuenta de servicios generales para determinar si se presenta consumo de agua sin facturar.	Monitoreos: Inspecciones y mediciones en campo

		hay consumo de agua sin facturar			
3	$f_{CMO}$	Factor de Consumo: Número de veces en que el consumo de servicios generales de un conjunto habitacional sin facturar excede el consumo de un usuario regular (ICUF).	Sin	<p>Su determinación se hace con base en la medición u aforo de los consumos de agua en la muestra de conjuntos habitacionales sin cuenta de servicios generales <math>N_{CH&gt;5}</math>.</p> <p>Se deben realizar campañas de lecturas de medidor totalizador y de medidor de cada cuenta en un intervalo de 2 semanas. Posteriormente procesar la información de medidores en acometidas totalizadoras y realizar el balance hídrico del conjunto habitacional.</p> <p>Aquellos conjuntos donde la medición realizada en el totalizador supera el ICUF conforman el factor de consumo considerado en la ecuación y puede inferirse como un parámetro para aplicar en otros conjuntos habitacionales</p>	Mediciones en totalizadoras

**Consumo no doméstico no facturado no medido  $C_{ndnf_2}$**

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios domésticos no medidos y no facturados. Su estimación se realiza con base en estudios o sugerencias de estimación bibliográficas y constituyen una fracción del consumo no facturado considerado como pérdidas reales de agua. Su estimación puede realizarse con base en la identificación de industrias o predios comerciales o institucionales de los cuales se sospecha realizan un consumo de agua, por tanto no cuentan con mediciones y tampoco facturación del servicio, la definición de su actividad económica y posteriormente su estimación con base en el promedio de la facturación de los últimos tres meses de usuarios no domésticos dedicados a actividades iguales o similares.

$$C_{ndnf_2} = \sum V_{nd_i} \quad \text{Ec. 4:48}$$

$$V_{nd_i} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad \text{Ec. 4:49}$$

**Tabla 4.13 – Variables y constantes Consumo no doméstico no facturado no medido  $C_{ndnf_2}$**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$V_{nd_i}$	Consumos individuales estimados por promedios facturados a predios similares que cuentan con registros de volumen o micromedición	m3	La estimación de estos consumos se puede realizar en primera medida con la identificación y confirmación de estos predios no domésticos, el reconocimiento de su actividad comercial y el establecimiento de un consumo con base en el promedio de los últimos tres meses de consumidores dedicados a actividades iguales o similares.	Monitoreos

### Usuarios autorizados no facturados no medidos Canf<sub>2</sub>

Corresponde al agua utilizada por todos los usuarios autorizados no facturada y no medida. Para el caso de Bogotá solo se encuentra autorizado el cuerpo de bomberos quienes por Ley Nacional pueden tomar agua de cualquier hidrante en ejercicio de su labor. Desafortunadamente no se realizan ni mediciones ni estimaciones de estos consumos.

$$\text{Canf}_2 = \sum Va_i \quad \text{Ec. 4:50}$$

**Tabla 4.14 – Variables y constantes Usuarios autorizados no facturados no medidos Canf\_2**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Va_i$	Volúmenes estimados o reportados por usuarios autorizados	m3	Diferentes tipos de estimación según el caso	Referencias bibliográficas, datos de actividades similares o mediciones directas o indirectas.

### Agua utilizada por la empresa de agua Ce<sub>1</sub>

Corresponde a los volúmenes de agua necesarios para atender determinados servicios no comercializados de carácter público o bien para mantener el funcionamiento apropiado de la red de distribución o de expansión del servicio de acueducto, se denominan también desperdicios por mantenimiento o consumos técnicos. A continuación los principales consumos de este tipo y su estimación para el caso de la EAAB E.S.P:

$$Ce_1 = Ce_{1\_dan} + Ce_{1\_Hid} + Ce_{1\_Ct} + Ce_{1\_Ltan} + Ce_{1\_Ltub} + Ce_{1\_Vac} \quad \text{Ec. 4:51}$$

- Daños presentados en la Red Matriz, contabilizados desde el momento en que se reportan hasta que son reparados, incluyendo el volumen necesario para desaguado para la reparación.

$$Ce_{1\_dan} = V_{Fuga} + V_{Desagûe} \quad \text{Ec. 4:52}$$

Con base en la ecuación del flujo por un orificio:

$$Q = CdA\sqrt{2gh} = A\sqrt{p} = \pi r^2 \sqrt{p} \quad \text{Ec. 4:53}$$

Y teniendo en cuenta que el caudal es la relación entre volumen y tiempo:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ec. 4:54}$$

$$V = Qt \quad \text{Ec. 4:55}$$

Es posible determinar el volumen en función del radio aproximado de la fuga o daño, la presión en ese punto y el tiempo que dura el agua saliendo por tal fuga:

$$V = \pi r^2 \sqrt{p} t \quad \text{Ec. 4:56}$$

De esta forma el volumen de daños puede determinar tanto el volumen de la fuga como el de desagüe:

$$V_{Fuga} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_F)^2 \times \sqrt{p_F} \times (t_2 - t_1) \times \frac{60}{1000} \quad \text{Ec. 4:57}$$

$$V_{Desagüe} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_D)^2 \times \sqrt{p_D} \times t \times \frac{60}{1000} \quad \text{Ec. 4:58}$$

**Tabla 4.15 – Variables y constantes Agua utilizada por la empresa en daños**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Ce_{1\_dan}$	Consumo realizado por la empresa debido a daños en las redes de suministro de agua potable	m3	Es producto de la suma del consumo debido a la cantidad de agua que se produce durante la fuga y la cantidad que se requiere desaguar para realizar la reparación correspondiente.	Comisiones de operación
2	$V_{Fuga}$	Volumen que se pierde por daños en la red	m3	Se calcula por medio de la ecuación de flujo del orificio con base en los tiempos de reporte de cada uno de los daños que se generan tanto en la red principal como de distribución del sistema de acueducto y el tiempo de reparación del mismo.	Gerencia servicio al cliente y comisiones operativas
3	$V_{Desagüe}$	Volumen que se necesita desaguar para realizar la reparación de la fuga.	m3	El desagüe generalmente se realiza por medio de hidrantes. Su cálculo se realiza igualmente a través de la ecuación de flujo a través de un orificio.	Comisiones operativas
4	$\phi_F$	Diámetro aproximado de la fuga	in	Diámetro aproximado de la fuga. Se realiza con base en la estimación visual que realiza el operador a cargo de la reparación de la fuga.	Formato reporte de daños
5	$\phi_D$	Diámetro de la tubería de desagüe	in	Diámetro de salida del hidrante o tubería por donde se realiza el desagüe.	Formato reporte de daños
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$p_F$	Presión de la tubería en el punto	m.c.a		



		donde se dio la fuga			
2	$t_2$	Hora de reparación de la fuga	Hora (min)	Se determina de acuerdo a la hora de llamada que realiza la persona que reporta el daño.	Servicio al cliente
3	$t_1$	Hora de reporte del daño	Hora (min)	Hora en que el operario que reporta haber realizado la reparación del daño.	Formato reporte de daños.
4	$p_D$	Presión de salida del desagüe	m.c.a		
5	6/100	Factor de conversión a m3/s	N/A	N/A	N/A

NOTA: La misma ecuación del orificio es la base para la deducción de varias de las siguientes componentes de consumos realizados por la empresa.

- Operación de hidrantes: Se utiliza la determinación del volumen utilizando información de presión en la red, diámetro de la boquilla de salida y el tiempo que dura la operación.

$$Ce_{1\_Hid} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_H)^2 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000} \quad \text{Ec. 4:59}$$

**Tabla 4.16 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa tomada de hidrantes**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Ce_{1\_Hid}$	Consumo tomado por la empresa directamente de hidrantes para la realización de actividades operativas.	m3	El consumo total debido a la toma de agua de hidrantes es producto de la suma de todos los consumos individuales de este tipo que se hayan realizado dentro de la unidad o sector hidráulica estudiada.	Reportes comisiones operativas.
2	$\phi_H$	Diámetro de tubería de salida del hidrante	in	Diámetro de salida del hidrante o tubería por donde se realiza el desagüe.	Formato reporte de actividades operativas
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$p$	Presión a la salida del hidrante	m.c.a		
2	$\Delta t$	Tiempo de descarga	min	Tiempo total en que se realiza la descarga de agua del hidrante.	Formato reporte de actividades operativas

- Suministro no comercializado a través de carrotaques para el desarrollo de actividades.

$$Ce_{1\_Ct} = V_{Ct} \times No. Ct \quad \text{Ec. 4:60}$$

**Tabla 4.17 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa tomada por carrotanques**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Ce_{1-Ct}$	Consumo suministrado a carrotanques para la realización de actividades operativas.	m3	El consumo total debido al suministro de agua a carrotanques para el desarrollo de actividades operativas o la suplencia de agua en sectores afectados por emergencias o daños en la red de suministro. El consumo total de este ítem se determina como la suma de todos los consumos individuales de este tipo que se hayan realizado dentro de la unidad o sector hidráulica estudiada.	Reportes comisiones operativas.
2	$V_{Ct}$	Volumen del carrotanque	m3		
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$No.Ct$	Número de cargas realizadas por el carrotanque	#	N/A	Reportes comisiones operativas.

- Lavado de tanques de almacenamiento

$$Ce_{1-Ltan} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_T)^2 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000} \quad \text{Ec. 4:61}$$

**Tabla 4.18 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa para desagüe de tanques**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$Ce_{1-Ltan}$	Consumo realizado para el lavado de tanques	m3	El consumo total debido al desagüe necesario para realizar el lavado de tanques.	Reportes comisiones operativas.
2	$\phi_T$	Diámetro de tubería de desagüe del tanque	in	Diámetro de salida de la tubería del tanque por donde se realiza el desagüe.	Reportes comisiones operativas.
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$p$	Presión a la salida del desagüe			
2	$\Delta t$	Tiempo de descarga	min	Tiempo total en que se realiza la descarga de agua del hidrante.	Formato reporte de actividades operativas

- Drenaje de redes de acueducto para operaciones de mantenimiento o labores especiales. Lavado o limpieza de redes.

$$C_{e_{1\_Ltub}} = V_{Desagüe} + V_{Lavado} \quad \text{Ec. 4:62}$$

**Tabla 4.19 – Variables y constantes Agua utilizada por la Empresa en lavado de tuberías**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$C_{e_{1\_Ltub}}$				
2	$V_{Desagüe}$				
3	$V_{Lavado}$				
4	$\phi_D$				
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$p_D$				

### **Consumo a través de conexiones ilegales $C_{il_2}$**

Corresponde a los estimados del consumo de conexiones ilegales que son determinados a través de registros anteriores. Cuando los hay, o estudios casa por casa en zonas de prueba, MZ o MIU. Los principales aportantes a estos consumos por conexiones ilegales son:

- Clandestinos masivos: Barrios No Legalizados no incluidos en el Ciclo I
- Clandestinos dispersos: Predios no facturados en barrios legales

$$C_{il_2} = C_{c\_masivos} + C_{c\_dispersos} \quad \text{Ec. 4:63}$$

### **Clandestinos masivos**

El caudal consumido por usuarios clandestinos masivos se calcula con base en la población estimada para cada asentamiento y el consumo per capita medido en asentamientos representativos. Para definir las áreas clandestinas se analizan las zonas de afectación ambiental o urbana, los desarrollos en proceso de legalización o que fueron legalizados recientemente.

Cuando NO hay macromedición del suministro al asentamiento clandestino masivo el calculo de su consumo se realiza por medio de la siguiente expresión:

$$C_{c\_masivos} = N_p \times \overline{C_{pCicloI}} \times (1 + IANCRNO) \quad \text{Ec. 4:64}$$

$$N_p = D_{pCland} \times A \quad \text{Ec. 4:65}$$

$$\overline{C_{pCicloI}} = \frac{Cdf_1 + Cndf_1 + Cdnf_1 + Cndnf_1}{Nf} \quad \text{Ec. 4:66}$$

$$IANCRNO = \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \quad \text{Ec. 4:67}$$

$$C_{c\_masivos} = D_{pCland} \times A \times \frac{Cdf + Cndf}{Nf} \times \left( 1 + \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right) \quad \text{Ec. 4:68}$$

$$C_{c\_masivos} = D_{pCland} \times A \times \frac{\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vnd_{v(i,i+1)_1}}{Nf_d + Nf_{nd}} \times \left( 1 + \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right) \quad \text{Ec. 4:69}$$

**Tabla 4.20 – Variables y constantes Consumo a través de conexiones ilegales Cil\_2 – Clandestinos masivos**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$C_{c\_masivos}$	Volumen suministrado a cada asentamiento con predios clandestinos masivos en el sector hidráulico estudiado.	m3/mes	Sumatoria de los consumos clandestinos masivos claramente identificados y estudiados.	Monitoreos en campo. Análisis bases de datos y sistemas de información geográfica.
2	$\overline{C_{pCicloI}}$	Consumo promedio de los suscriptores de Ciclo I del mismo sector al que pertenece el asentamiento clandestino (este consumo incluye el consumo facturado ICUF más el consumo no facturado)	m3/predio/mes	Relación entre la sumatoria de consumos domésticos facturados, no facturados, no domésticos facturados y no facturado y el número de predios facturados en el sector con nivel socioeconómico similar al de los sectores estudiados.	Micromedición sector
3	$IANCRNO$	Índice de Pérdidas Técnicas de Redes No Oficiales	%	Medición del caudal mínimo nocturno y del caudal máximo diario. El IANC de redes no oficiales se determina como el cociente entre	Este método se basa en el supuesto de que el consumo autorizado cae

				la medición nocturna (fugas o pérdidas técnicas) y el caudal promedio.	a un mínimo durante las horas nocturnas (usualmente entre las 2 y las 4 am). Por lo tanto, las pérdidas reales o el índice de agua no contabilizada representan el porcentaje máximo del flujo.
4	$Q_{\min\_noct}$	Caudal mínimo nocturno	m3/s	Medición continua del caudal registrado en la zona de estudio entre 2 y 4 am.	
5	$Q_{Max\_Diario}$	Caudal máximo diario suministrado	m3/s	Máximo caudal registrado durante el día en la zona de estudio resultado de mediciones continuas.	Macromedición / Micromedición
6	$Cdf_1$	Consumo doméstico facturado medido	m3	Corresponde a la suma de los volúmenes medidos de todas las vigencias que conforman la unidad hidráulica o sector en estudio con el mismo nivel socioeconómico de los consumidores clandestinos identificados.	
7	$Cndf_1$	Consumo no doméstico facturado medido	m3		
8	$Cdnf_1$	Consumo doméstico no facturado medido	m3		
9	$Cndnf_1$	Consumo no doméstico no facturado medido	m3		
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$N_p$	Número de predios potenciales consumidores de agua en cada área identificada.	#	Identificación en el sector hidráulico de estudio de las áreas o barrios con consumos clandestinos masivos y posteriormente una estimación del número de predios pertenecientes a este grupo.	Monitoreos. Análisis de sistemas de información geográfica y bases de datos.
2	$D_{pCland}$	Densidad de Predios Clandestinos	Predios /Ha	Análisis cartográfico de áreas con asentamientos clandestinos para determinar la densidad típica, o determinación del número de predios en cada asentamiento	
3	A	Área del asentamiento con predios clandestinos	Ha	Medición mediante el SIG de las áreas (Ha) con asentamientos clandestinos	Sistemas de información geográfica y labores de campo.
4	$N_f$	Número de facturas o suscriptores legales pertenecientes al mismo nivel socioeconómico del sector de estudio.	#	Sumatoria facturas domésticas y no domésticas.	Sistemas de información comercial.

### Clandestinos dispersos

El caudal consumido por clandestinos dispersos se estima con base en un censo predio a predio, o bien indirectamente, a través del registro de usuarios suspendidos o cortados durante un tiempo superior a 1 año, reportes de la comunidad, información de rutas de lectura. Estimado el número de posibles clandestinos dispersos, se calcula su consumo con base a la siguiente expresión:

$$C_{c\_dispersos} = N_{PSPC} \times ICUF \times f_e \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:70}$$

$$C_{c\_dispersos} = N_{PSPC} \times \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{N_f} \times \frac{N_{PE}}{N_{PSPC}} \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:71}$$

$$C_{c\_dispersos} = \frac{\sum_{v=1}^{No.vig.SH} Vd_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig.SH} Vnd_{v(i,i+1)_1}}{N_{fd} + N_{fnd}} \times N_{PE} \times f_{CMO} \quad \text{Ec. 4:72}$$

**Tabla 4.21 – Variables y constantes Variables y constantes Consumo a través de conexiones ilegales Cil\_2 – Clandestinos dispersos**

VARIABLES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$C_{c\_dispersos}$	Volumen anual de pérdidas por consumos de clandestinos dispersos en cada sector hidráulico	m3/mes	Calculado	SIG, bases de datos, investigación en campo. Mediciones
2	ICUF	Índice de consumo promedio por usuario de cada sector hidráulico	m3/suscip/mes	Corresponde a la suma de los volúmenes medidos de todas las vigencias que conforman la unidad hidráulica o sector en estudio con el mismo nivel socioeconómico de los consumidores dispersos identificados.	Micromedición
3	$Cdf_1$	Consumo doméstico facturado medido	m3		Micromedición
4	$Cndf_1$	Consumo doméstico facturado no medido	m3		Micromedición
CONSTANTES					
No.	ID	NOMBRE	UN	DETERMINACIÓN	FUENTES DE INFORMACIÓN
1	$N_{PSPC}$	Número de predios sin punto de consumo	#	Identificación con ayuda del SIG y del CHIP de los predios sin punto de consumo en cada sector hidráulico.	Sistemas de información geográfica y verificación en campo.
2	$f_e$	Factor de éxito: Proporción de los predios clandestinos dispersos sin punto de consumo en los que se confirma (se puede esperar) que hay consumo de agua sin facturar	sin	Realización de inspecciones a una muestra de predios sin punto de consumo para determinar si se presenta consumo de agua sin facturar. Se determina el valor de $f_e$ a partir de estas inspecciones.	Monitoreos y estudios en campo.
3	$f_{CMO}$	Factor de Consumo: Número de veces en que el consumo de un predio clandestino masivo excede el consumo de un usuario regular (ICUF).	sin	Medición o aforo de los consumos de agua en una muestra de predios clandestinos dispersos. La relación entre los puntos encontrados sin medición y el número total de predios analizados corresponden al factor $f_{CMO}$	Mediciones puntuales.

				Actualmente se asume que el consumo de estos predios es el doble del consumo promedio por usuario del sector pero debe reforzarse su medición.	
4	$N_f$	Número de facturas o suscriptores legales pertenecientes al mismo nivel socioeconómico del sector de estudio.	#	Sumatoria facturas domésticas $N_{f_d}$ y no domésticas $N_{f_{nd}}$ .	Sistemas de información comercial.

#### Consumo a través de medidores rotos y punteados Cfr<sub>2</sub>

Corresponde a estimados del consumo de medidores rotos o punteados, su estimación se realiza con base en la confirmación de predios fraudulentos mediante investigaciones de campo y la estimación del volumen consumido en base al consumo promedio de predios facturados pertenecientes al mismo sector.

## 4.2 Indicadores

### Índice de Agua No Contabilizada Sistema - IANC

Corresponde al porcentaje de agua no facturada en relación con el agua tratada y suministrada a Bogotá o a la unidad hidráulica considerada. Su cálculo se realiza a través de la siguiente expresión:

$$IANC = 1 - \frac{Cf}{Vi_1 - Vex_1} \quad \text{Ec. 4:73}$$

$$IANC = 1 - \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Vi_1 - Vex_1} \quad \text{Ec. 4:74}$$

Cf: Volumen facturado total, doméstico y no doméstico.

$Vi_1 - Vex_1$ : Volumen tratado y suministrado menos el volumen exportado.

Su finalidad o propósito es evaluar la gestión en control de pérdidas de agua teniendo como base el porcentaje de agua no facturado en relación con el volumen producido. Ante una tendencia ascendente del consumo total, un menor porcentaje en pérdidas refleja mejoramiento. En caso contrario, el análisis debe complementarse con la evaluación del volumen total suministrado a las redes e índice de pérdidas por usuario facturado.

La normatividad que lo rige se encuentra en las resoluciones CRA 12/95 y 315 de febrero 11/2005 "Nivel de Riesgo de las ESPD". Resoluciones CRA 12/95 y 315 de febrero 11/2005 "Nivel de Riesgo de las ESPD".

### Índice de pérdidas por usuario facturado – IPUF

Es el volumen, en m<sup>3</sup>, no facturado por cada usuario facturado o Índice de pérdidas por usuario facturado.

$$IPUF = \frac{Vi_1 - Vex_1 - Cf}{Nf} \quad \text{Ec. 4:75}$$

$$IPUF = \frac{Vi_1 - Vex_1 - Cdf_1 + Cndf_1}{Nfd + Nfnd} \quad \text{Ec. 4:76}$$



$V_{i_1} - V_{ex_1}$  : Volumen tratado y suministrado menos el volumen exportado en la unidad hidráulica considerado.

$Cf$  :  $Cdf_1 + Cndf_1$  Volúmenes facturados, domésticos y no domésticos del intervalo considerado y para la unidad hidráulica estudiada.

$Nf$  : Facturas emitidas o tenidas en cuenta para determinación de  $Cf$  . Es igual a la suma de facturas domésticas y no domésticas,  $Nfd + Nfnd$ .

El resultado es favorable si cumple con la meta prevista o en caso contrario a menor pérdida por usuario facturado en relación con el año anterior.

#### Consumo promedio por usuario facturado – ICUF

$$ICUF = \frac{Cf}{Nf} \quad \text{Ec. 4:77}$$

$$ICUF = \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Nfd + Nfnd} \quad \text{Ec. 4:78}$$

$Cf$  :  $Cdf_1 + Cndf_1$  Volúmenes facturados, domésticos y no domésticos del intervalo considerado y para la unidad hidráulica estudiada.

$Nf$  : Facturas emitidas o tenidas en cuenta para determinación de  $Cf$  . Es igual a la suma de facturas domésticas y no domésticas,  $Nfd + Nfnd$ .

El resultado es favorable si se cumple con la meta. Lo ideal es incrementar el consumo.

#### Suministro promedio por usuario facturado - ISUF

Evaluar el suministro de agua promedio por usuario facturado.

$$ISUF = \frac{V_{i_1} - V_{ex_1}}{Nf} \quad \text{Ec. 4:79}$$

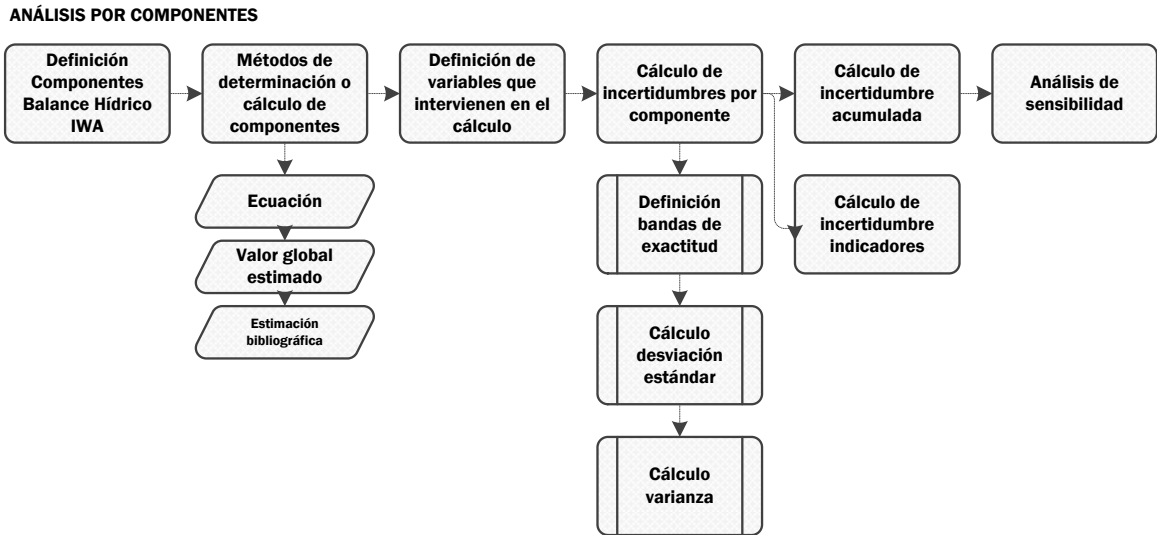
$V_{i_1} - V_{ex_1}$  : Volumen tratado y suministrado menos el volumen exportado en la unidad hidráulica considerado.

$Nf$  : Facturas emitidas o tenidas en cuenta para determinación de  $Cf$  . Es igual a la suma de facturas domésticas y no domésticas,  $Nfd + Nfnd$ .

### 4.3 Desarrollo de ecuaciones de incertidumbre para cada componente

El modelo conceptual para la definición de la incertidumbre presente en el balance hídrico de un sistema de acueducto como el de Bogotá se ha definido para el presente trabajo de investigación en el desarrollo y análisis de cada uno de los pasos considerados en el siguiente esquema:

**Ilustración 4-9 – Contenido modelo Conceptual**



En secciones anteriores se ha trabajado en la definición clara de cada uno de los componentes del balance hídrico definido por la IWA y aplicado al sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá.

Con base en cada una de estas componentes y teniendo en cuenta las particularidades del sistema de acueducto como caso de estudio, se realizó el desglose máximo posible de cada una de estas componentes, terminando por definir cada una de las expresiones matemáticas que lo componen, dejando explícitas cada una de las variables y constantes a considerar.

De igual forma se realizó el planteamiento de varias alternativas de cálculo de las mismas, considerando vías de estimación que permitan jugar con las incertidumbres más adelante.

El siguiente paso consiste en el cálculo de la incertidumbre de cada una de las ecuaciones de cálculo que define cada una de las componentes del balance hídrico IWA.

### **Fundamento matemático**

A partir de las ecuaciones 2.1 y 2.26 es posible calcular la incertidumbre de una variable cuando esta se encuentra a su vez en función de otras variables.

Desviación estándar a partir de la consideración de límites de confianza del 95%.

$$\sigma = \frac{Q*BE}{1.96}$$

Incertidumbre acumulada para una variable dependiente en función de la incertidumbre de las variables independientes:

$$S_w^2 = \left(\frac{df}{dx_1}\right)^2 S_{x_1}^2 + \left(\frac{df}{dx_2}\right)^2 S_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_n}\right)^2 S_{x_n}^2$$

Por tanto es posible calcular las incertidumbres individuales para cada una de las componentes del balance, considerando como variables todos aquellos términos que sean producto de mediciones directas y manteniendo constante todo lo demás. A continuación el cálculo de tales incertidumbres:

### **Volumen de entrada al Sistema $V_{i1}$**

La ecuación que define el volumen de entrada al sistema es:

$$V_{i1(m^3)} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{No. días mes}} \sum_{j=1}^{48} Q_{\text{horario } i,j}}{48 \times \text{No. días mes}} \times 86.4$$

Que para un mejor entendimiento puede expresarse de la siguiente forma:

$$V_{i1(m^3)} = \frac{86.4}{48} (Q_{1,1} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + \dots + Q_{30,48} + Q_{i,j})$$

Tomando como variables independientes cada uno de los caudales horarios y dejando constante el resto, tenemos que la varianza de  $V_{i1}$  es:

$$\sigma_{V_{i1}}^2 = \left(\frac{dV_{i1}}{dQ_{\text{horario } i,j}}\right)^2 \sigma_{Q_{\text{horario } i,j}}^2$$

Que al extenderse

$$\sigma_{Vi}^2 = \left(\frac{dVi}{dQ_{1,1}}\right)^2 \sigma_{Q_{1,1}}^2 + \left(\frac{dVi}{dQ_{1,2}}\right)^2 \sigma_{Q_{1,2}}^2 + \left(\frac{dVi}{dQ_{1,2}}\right)^2 \sigma_{Q_{1,2}}^2 + \dots + \left(\frac{dVi}{dQ_{30,48}}\right)^2 \sigma_{Q_{30,48}}^2 + \left(\frac{dVi}{dQ_{i,j}}\right)^2 \sigma_{Q_{i,j}}^2$$

Y aplicando la teoría de límites de confianza del 95%, se tiene que:

$$\sigma_{Vi}^2 = \left(\frac{86.4}{48}\right)^2 \left( \left(\frac{BE \times Q_{1,1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Q_{1,2}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Q_{1,3}}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Q_{30,48}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Q_{i,j}}{1.96}\right)^2 \right)$$

Quedando simplificada en:

$$\sigma_{Vi}^2 = \left(\frac{86.4}{48}\right)^2 \sum \left(\frac{BE \times Q_{horario_{i,j}}}{1.96}\right)^2$$

### Volumen de agua exportada $V_{exp1}$

$$V_{exp1(m^3)} = \frac{\sum_{j=1}^{No.días\ me} \sum_{i=1}^{48} Q_{horario_{i,j}}}{48 \times No. días\ mes} \times 86.4$$

$$\sigma_{exp}^2 = \left(\frac{86.4}{48 \times No. días\ mes}\right)^2 \sum \left(\frac{BE \times Q_{horario_{i,j}}}{1.96}\right)^2$$

### Consumo doméstico facturado medido $Cdf_1$

$$Cdf_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{v(i,i+1)}$$

$$Cdf_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{V'_{i+2} - V'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right) (D_{i+1} - D'_i) + V'_i - \left( \frac{V'_i - V'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} \right) (D_i + D'_{i-2}) - V'_{i-2}$$

$$+ \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{V'_{i+1} - V'_{i-1}}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right) (D_{i+1} - D_i) - V'_{i-1}$$

$$Cdf_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right) (V'_{i+2} - V'_i) + V'_i - \left( \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} \right) (V'_i - V'_{i-2}) - V'_{i-2}$$

$$+ \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right) (V'_{i+1} - V'_{i-1}) - V'_{i-1}$$

$$\sigma_{Cdf1}^2 = \left(\frac{dCdf1}{dV'_{i+2}}\right)^2 \sigma_{V'_{i+2}}^2 + \left(\frac{dCdf1}{dV'_i}\right)^2 \sigma_{V'_i}^2 + \left(\frac{dCdf1}{dV'_{i-2}}\right)^2 \sigma_{V'_{i-2}}^2 + \left(\frac{dCdf1}{dV'_{i+1}}\right)^2 \sigma_{V'_{i+1}}^2 + \left(\frac{dCdf1}{dV'_{i-1}}\right)^2 \sigma_{V'_{i-1}}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Cdf}_1}^2 = & \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \sigma_{V'_{i+2}}^2 + \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \sigma_{V'_i}^2 \\ & + \left( \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \sigma_{V'_{i-2}}^2 + \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \sigma_{V'_{i+1}}^2 \\ & + \left( -\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \sigma_{V'_{i-1}}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Cdf}_1}^2 = & \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i+2}}{1.96} \right)^2 + \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_i}{1.96} \right)^2 \\ & + \left( \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i-2}}{1.96} \right)^2 + \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i+1}}{1.96} \right)^2 \\ & + \left( -\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i-1}}{1.96} \right)^2\end{aligned}$$

### Consumo no doméstico facturado medido $\text{Cndf}_1$

$$\text{Cndf}_{1(i,i+1)} = \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{v(i,i+1)}$$

$$V_{v(i,i+1)} = \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right) (V'_{i+1} - V'_{i-1}) - V'_{i-1}$$

$$\sigma_{\text{Cndf}_1}^2 = \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i+1}}{1.96} \right)^2 + \left( -\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} \left( \frac{\text{BE} \times V'_{i-1}}{1.96} \right)^2$$

### Consumo doméstico facturado no medido $\text{Cdf}_2$

$$\text{Cdf}_2 = N_{\text{sus\_ciclo}_1} \times \left( \frac{\sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{ij}}}{48} \times 86.4}{N_{\text{sus\_ciclo}_1}} \times \left( 1 - \frac{Q_{\text{min\_noct}}}{Q_{\text{Max\_Diario}}} \right) - \frac{\sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{nd_{v(i,i+1)}}}{N_f} \right)$$

$$\text{Cdf}_2 = N_{\text{sus\_ciclo}_1} \times \left( \frac{\sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{ij}}}{48} \times 86.4}{N_{\text{sus\_ciclo}_1}} - \frac{\sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{ij}}}{48} \times 86.4 \frac{Q_{\text{min\_noct}}}{Q_{\text{Max\_Diario}}} - \frac{\sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{nd_{v(i,i+1)}}}{N_f} \right)$$

$$\text{Cdf}_2 = \frac{86.4}{48} \sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{ij}} - \frac{86.4}{48} \frac{Q_{\text{min\_noct}}}{Q_{\text{Max\_Diario}}} \sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{\text{horario}_{ij}} - \frac{N_{\text{sus\_ciclo}_1}}{N_f} \left( \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{nd_{v(i,i+1)}} \right)$$

$$\text{Cdf}_2 = \left( \frac{86.4}{48} \right) \left( 1 - \frac{Q_{\text{min\_noct}}}{Q_{\text{Max\_Diario}}} \right) \sum_{j=1}^{\text{No.días me}} \sum_{i=1}^{48} Q_{ij} - \frac{N_{\text{sus\_ciclo}_1}}{N_f} \left( \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{\text{No.vig\_SH}} V_{nd_{v(i,i+1)}} \right)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Cdf_2}^2 &= \left(\frac{dCdf_2}{dQ_{i,j}}\right)^2 \sigma_{Q_{i,j}}^2 + \left(\frac{dCdf_2}{dQ_{min\_noct}}\right)^2 \sigma_{Q_{min\_noct}}^2 + \left(\frac{dCdf_2}{dQ_{MaxDiario}}\right)^2 \sigma_{Q_{MaxDiario}}^2 + \left(\frac{dCdf_2}{dv_d}\right)^2 \sigma_{v_d}^2 + \left(\frac{dCdf_2}{dQ_{MaxDiario}}\right)^2 \sigma_{Vnd}^2 \\ \sigma_{Cdf_2}^2 &= \left(\frac{86.4}{48}\right) \left(1 - \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{MaxDiario}}\right)^2 \sum_{j=1}^{No.días\ mes} \sum_{i=1}^{48} \left(\frac{BE \times Q_{i,j}}{1.96}\right)^2 + \left(-\frac{86.4 \times Q_{i,j}}{48 \times Q_{MaxDiario}}\right)^2 \left(\frac{BE \times Q_{min\_noct}}{1.96}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{86.4 \times Q_{i,j} \times Q_{min\_noct}}{48 \times Q_{MaxDiario}^2}\right)^2 \left(\frac{BE \times Q_{MaxDiario}}{1.96}\right)^2 \\ &+ \left(\left(\frac{N_{sus\_ciclo,1}}{N_f}\right)^2 \left(\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i}\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vd'_{i+2}}^2 + \left(-\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vd'_i}^2\right. \\ &+ \left(-\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vd'_{i-2}}^2 + \left(\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}}\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vd'_{i+1}}^2 \\ &+ \left(-\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vd'_{i-1}}^2 \left. \right) \\ &+ \left(\left(\frac{N_{sus\_ciclo,1}}{N_f}\right)^2 \left(\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i}\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vnd'_{i+2}}^2 + \left(-\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vnd'_i}^2\right. \\ &+ \left(-\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vnd'_{i-2}}^2 + \left(\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}}\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vnd'_{i+1}}^2 \\ &+ \left(-\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1\right)^2 \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{Vnd'_{i-1}}^2 \left. \right) \end{aligned}$$

### Consumo no doméstico facturado no medido Cndf<sub>2</sub>

$$Cndf_2 = \sum Vnd_i$$

$$\sigma_{Cndf_2}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{Vnd_i}^2$$

$$\sigma_{Cndf_2}^2 = \sigma_{Vnd_1}^2 + \sigma_{Vnd_2}^2 + \sigma_{Vnd_3}^2 + \dots + \sigma_{Vnd_{N-1}}^2 + \sigma_{Vnd_N}^2$$

$$\sigma_{Cndf_2}^2 = \left(\frac{BE \times Vnd_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Vnd_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_N}{1.96}\right)^2$$

### Consumo doméstico no facturado medido Cdnf<sub>1</sub>

$$Cdnf_1 = \sum Vd_i$$

$$\sigma_{Cdnf_1}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{Vd_i}^2$$

$$\sigma_{Cdnf_1}^2 = \sigma_{Vd_1}^2 + \sigma_{Vd_2}^2 + \sigma_{Vd_3}^2 + \dots + \sigma_{Vd_{N-1}}^2 + \sigma_{Vd_N}^2$$

$$\sigma_{Cdnf_1}^2 = \left(\frac{BE \times Vd_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vd_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vd_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Vd_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vd_N}{1.96}\right)^2$$

**Consumo no doméstico no facturado medido Cndnf<sub>1</sub>**

$$Cndnf_1 = \sum Vnd_i$$

$$\sigma_{Cndnf_1}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{Vnd_i}^2$$

$$\sigma_{Cndnf_1}^2 = \sigma_{Vnd_1}^2 + \sigma_{Vnd_2}^2 + \sigma_{Vnd_3}^2 + \dots + \sigma_{Vnd_{N-1}}^2 + \sigma_{Vnd_N}^2$$

$$\sigma_{Cndnf_1}^2 = \left(\frac{BE \times Vnd_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Vnd_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_N}{1.96}\right)^2$$

**Usuarios autorizados no facturados medidos Canf<sub>1</sub>**

$$Canf_1 = \sum Va_i$$

$$\sigma_{Canf_1}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{Va_i}^2$$

$$\sigma_{Canf_1}^2 = \sigma_{Va_1}^2 + \sigma_{Va_2}^2 + \sigma_{Va_3}^2 + \dots + \sigma_{Va_{N-1}}^2 + \sigma_{Va_N}^2$$

$$\sigma_{Canf_1}^2 = \left(\frac{BE \times Va_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Va_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Va_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Va_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Va_N}{1.96}\right)^2$$

**Consumo doméstico no facturado no medido Cdnf<sub>2</sub>**

$$Cdnf_2 = \frac{\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vnd_{v(i,i+1)_1}}{Nf_d + Nf_{nd}} \times N_{CE} \times f_{CMO}$$

$$Cdnf_2 = \frac{N_{CE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)} + \frac{N_{CE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vnd_{v(i,i+1)} \quad 1$$

$$\sigma_{Cdnf_2}^2 = \left(\frac{dCdnf_2}{dV_d}\right)^2 \sigma_{V_d}^2 + \left(\frac{dCdnf_2}{dV_{nd}}\right)^2 \sigma_{V_{nd}}^2$$

$$\sigma_{Cdnf_2}^2 = \left(\frac{N_{CE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}}\right)^2 \left(\sum \left(\frac{BE \times V_d}{1.96}\right)^2 + \sum \left(\frac{BE \times V_{nd}}{1.96}\right)^2\right)$$

**Consumo no doméstico no facturado no medido Cndnf<sub>2</sub>**

$$Cndnf_2 = \sum Vnd_i$$

$$\sigma_{\text{Cndnf}_2}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{Vnd_i}^2$$

$$\sigma_{\text{Cndnf}_2}^2 = \sigma_{Vnd_1}^2 + \sigma_{Vnd_2}^2 + \sigma_{Vnd_3}^2 + \dots + \sigma_{Vnd_{N-1}}^2 + \sigma_{Vnd_N}^2$$

$$\sigma_{\text{Cndnf}_2}^2 = \left(\frac{BE \times Vnd_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times Vnd_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times Vnd_N}{1.96}\right)^2$$

**Usuarios autorizados no facturados no medidos Canf<sub>2</sub>**

$$\text{Canf}_2 = \sum V a_i$$

$$\sigma_{\text{Canf}_2}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{V a_i}^2$$

$$\sigma_{\text{Canf}_2}^2 = \sigma_{V a_1}^2 + \sigma_{V a_2}^2 + \sigma_{V a_3}^2 + \dots + \sigma_{V a_{N-1}}^2 + \sigma_{V a_N}^2$$

$$\sigma_{\text{Canf}_2}^2 = \left(\frac{BE \times V a_1}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times V a_2}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times V a_3}{1.96}\right)^2 + \dots + \left(\frac{BE \times V a_{N-1}}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{BE \times V a_N}{1.96}\right)^2$$

**Agua utilizada por la empresa de agua Ce<sub>1</sub>**

$$Ce_{1\_dan} = V_{\text{Fuga}} + V_{\text{Desagûe}}$$

$$V_{\text{Fuga}} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_F)^2 \times \sqrt{p_F} \times (t_2 - t_1) \times \frac{60}{1000}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\phi_D}$$

$$\sigma^2 = CV^2 \phi_F^2$$

$$\sigma_{V_{\text{Fuga}}}^2 = \left(3.1416 \times 0.0006452 \times \sqrt{p_F} \times (t_2 - t_1) \times \frac{60}{1000}\right)^2 CV^4 \phi_F^4$$

$$V_{\text{Desagûe}} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_D)^2 \times \sqrt{p_D} \times t \times \frac{60}{1000}$$

$$\sigma_{V_{\text{Desagûe}}}^2 = \left(3.1416 \times 0.0006452 \times \sqrt{p_D} \times t \times \frac{60}{1000}\right)^2 CV^4 \phi_D^4$$

$$Ce_{1\_Hid} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_H)^2 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000}$$

$$\sigma_{V_{\text{Hid}}}^2 = \left(3.1416 \times 0.0006452 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000}\right)^2 CV^4 \phi_H^4$$

$$Ce_{1\_Ct} = V_{\text{Ct}} \times \text{No. Ct}$$

$$\sigma_{V_{\text{Ct}}}^2 = (\text{No. Ct})^2 CV^2 V_{\text{Ct}}^2$$



$$C_{e_{1-Ltan}} = 3.1416 \times (0.0254 \times \phi_T)^2 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000}$$

$$\sigma_{V_{Ltan}}^2 = \left( 3.1416 \times 0.0006452 \times \sqrt{p} \times \Delta t \times \frac{60}{1000} \right)^2 CV^4 \phi_T^4$$

## Consumo a través de conexiones ilegales Cil<sub>2</sub>

### Clandestinos masivos

$$C_{C\_masivos} = D_{pCland} \times A \times \frac{\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{nd_{v(i,i+1)}}}{Nf_d + Nf_{nd}} \times \left( 1 + \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right)$$

$$C_{C\_masivos} = \frac{D_{pCland} \times A}{Nf_d + Nf_{nd}} \times \left( 1 + \frac{Q_{min\_noct}}{Q_{Max\_Diario}} \right) \times \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{d_{v(i,i+1)}} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} V_{nd_{v(i,i+1)}}$$

$$\sigma_{C\_masivos}^2 = \left( \frac{dC\_masivos}{dQ_{min\_noct}} \right)^2 \sigma_{Q_{min\_noct}}^2 + \left( \frac{dC\_masivos}{dQ_{Max\_Diario}} \right)^2 \sigma_{Q_{Max\_Diario}}^2 + \left( \frac{dC\_masivos}{dV_d} \right)^2 \sigma_{V_d}^2 + \left( \frac{dC\_masivos}{dV_{nd}} \right)^2 \sigma_{V_{nd}}^2$$

$$\sigma_{C\_masivos}^2 = \left( \frac{D_{pCland} \times A \times V_d \times V_{nd}}{(Nf_d + Nf_{nd}) Q_{Max\_Diario}} \right)^2 \sigma_{Q_{min\_noct}}^2 + \left( \frac{D_{pCland} \times A \times Q_{min\_noct} \times V_d \times V_{nd}}{(Nf_d + Nf_{nd}) \times (Q_{Max\_Diario}^2)} \right)^2 \sigma_{Q_{Max\_Diario}}^2$$

$$+ \left( \frac{D_{pCland} \times A \times Q_{min\_noct}}{(Nf_d + Nf_{nd}) \times Q_{Max\_Diario}} \right)^2 \sigma_{V_d}^2 + \left( \frac{D_{pCland} \times A \times Q_{min\_noct}}{(Nf_d + Nf_{nd}) \times Q_{Max\_Diario}} \right)^2 \sigma_{V_{nd}}^2$$

$$\sigma_{Q_{min\_noct}}^2 = \left( \frac{BE \times Q_{min\_noct}}{1.96} \right)^2$$

$$\sigma_{Q_{Max\_Diario}}^2 = \left( \frac{BE \times Q_{Max\_Diario}}{1.96} \right)^2$$

$$\sigma_{V_d}^2 + \sigma_{V_{nd}}^2 = \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \sigma_{V_{i+2}}^2 + \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \sigma_{V_i}^2$$

$$+ \left( -\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \sigma_{V_{i-2}}^2 + \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \sigma_{V_{i+1}}^2$$

$$+ \left( -\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \sigma_{V_{i-1}}^2$$

$$\sigma_{V_d}^2 + \sigma_{V_{nd}}^2 = \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_{i+2}}{1.96} \right)^2$$

$$+ \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_i}{1.96} \right)^2$$

$$+ \left( -\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^2 \sum_{v=1}^{2 No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_{i-2}}{1.96} \right)^2$$

Clandestinos dispersos

$$C_{c\_dispersos} = \frac{\sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vnd_{v(i,i+1)}}{Nf_d + Nf_{nd}} \times N_{PE} \times f_{CMO}$$

$$C_{c\_dispersos} = \frac{N_{PE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \left( \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vd_{v(i,i+1)} + \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} Vnd_{v(i,i+1)} \right)$$

$$\sigma_{C\_dispersos}^2 = \left( \frac{dC\_dispersos}{dVd} \right)^2 \sigma_{Vd}^2 + \left( \frac{dC\_dispersos}{dVnd} \right)^2 \sigma_{Vnd}^2$$

$$\sigma_{C\_dispersos}^2 = \left( \frac{N_{PE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \right)^2 \sigma_{Vd}^2 + \left( \frac{N_{PE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \right)^2 \sigma_{Vnd}^2$$

$$\sigma_{C\_dispersos}^2 = \left( \frac{N_{PE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \right)^2 \sigma_{Vd}^2 + \left( \frac{N_{PE} \times f_{CMO}}{Nf_d + Nf_{nd}} \right)^2 \sigma_{Vnd}^2$$

$$\sigma_{Vd}^2 + \sigma_{Vnd}^2 = \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{V_{i+2}}^2 + \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{V_i}^2$$

$$+ \left( -\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{V_{i-2}}^2 + \left( \frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{V_{i+1}}^2$$

$$+ \left( -\frac{D_{i+1} - D_i}{D'_{i+1} - D'_{i-1}} - 1 \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \sigma_{V_{i-1}}^2$$

$$\sigma_{Vd}^2 + \sigma_{Vnd}^2 = \left( \frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_{i+2}}{1.96} \right)^2$$

$$+ \left( -\frac{D_{i+1} - D'_i}{D'_{i+2} - D'_i} - \frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} + 1 \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_i}{1.96} \right)^2$$

$$+ \left( -\frac{D_i + D'_{i-2}}{D'_i - D'_{i-2}} - 1 \right)^{2 No.vig\_SH} \sum_{v=1}^{No.vig\_SH} \left( \frac{BE \times V'_{i-2}}{1.96} \right)^2$$

**4.4 Desarrollo de ecuaciones de incertidumbre para principales indicadores.**

IANC

$$IANC = \frac{Vf}{Vi} = \frac{Cf}{Vi_1 - Vex_1}$$

$$IANC = \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Vi_1 - Vexp_1}$$

$$IANC = \frac{Cdf_1}{Vi_1 - Vexp_1} + \frac{Cndf_1}{Vi_1 - Vexp_1}$$

$$\sigma_{IANC}^2 = \left(\frac{dIANC}{dCdf_1}\right)^2 \sigma_{Cdf_1}^2 + \left(\frac{dIANC}{dCndf_1}\right)^2 \sigma_{Cndf_1}^2 + \left(\frac{dIANC}{dVi_1}\right)^2 \sigma_{Vi_1}^2 + \left(\frac{dIANC}{dVexp_1}\right)^2 \sigma_{Vexp_1}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_{IANC}^2 &= \left(\frac{1}{Vi_1 - Vexp_1}\right)^2 \sum \left(\frac{Cdf_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{1}{Vi_1 - Vexp_1}\right)^2 \sum \left(\frac{Cndf_1 \times BE}{1.96}\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Vi_1^2}\right)^2 \sum \left(\frac{Vi_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Vexp_1^2}\right)^2 \sum \left(\frac{Vexp_1 \times BE}{1.96}\right)^2 \end{aligned}$$

### IPIUF

$$IPIUF = \frac{Vi_1 - Vexp_1 - Cf}{Nac} \quad \text{Ec. 4:80}$$

$$IPIUF = \frac{Vi_1 - Vexp_1 - Cdf_1 + Cndf_1}{FE} \quad \text{Ec. 4:81}$$

$$\sigma_{IPIUF}^2 = \left(\frac{dIPIUF}{dVi_1}\right)^2 \sigma_{Vi_1}^2 + \left(\frac{dIPIUF}{dVexp_1}\right)^2 \sigma_{Vexp_1}^2 + \left(\frac{dIPIUF}{dCdf_1}\right)^2 \sigma_{Cdf_1}^2 + \left(\frac{dIPIUF}{dCndf_1}\right)^2 \sigma_{Cndf_1}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_{IPIUF}^2 &= \left(\frac{1}{FE}\right)^2 \left( \sum \left(\frac{Vi_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \sum \left(\frac{Vexp_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \sum \left(\frac{Cdf_1 \times BE}{1.96}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum \left(\frac{Cndf_1 \times BE}{1.96}\right)^2 \right) \end{aligned}$$

### ICUF

$$ICUF = \frac{cf}{Nf}$$

$$ICUF = \frac{Cdf_1 + Cndf_1}{Nf_d + Nf_{nd}}$$

$$\sigma_{ICUF}^2 = \left(\frac{dICUF}{dCdf_1}\right)^2 \sigma_{Cdf_1}^2 + \left(\frac{dICUF}{dCndf_1}\right)^2 \sigma_{Cndf_1}^2$$

$$\sigma_{ICUF}^2 = \left(\frac{1}{Nf_d + Nf_{nd}}\right)^2 \left(\sum \left(\frac{Cdf_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \sum \left(\frac{Cndf_1 \times BE}{1.96}\right)^2\right)$$

**ISUF**

$$ISUF = \frac{Vi_1 - Vexp_1}{Nf}$$

$$\sigma_{ISUF}^2 = \left(\frac{dISUF}{dVi_1}\right)^2 \sigma_{Vi_1}^2 + \left(\frac{dISUF}{dVexp_1}\right)^2 \sigma_{Vexp_1}^2$$

$$\sigma_{ISUF}^2 = \left(\frac{1}{Nf_d + Nf_{nd}}\right)^2 \left(\sum \left(\frac{Vi_1 \times BE}{1.96}\right)^2 + \sum \left(\frac{Vexp_1 \times BE}{1.96}\right)^2\right)$$

**4.5 Definición de criterios para asignación de bandas de confianza y asignación de las mismas.**

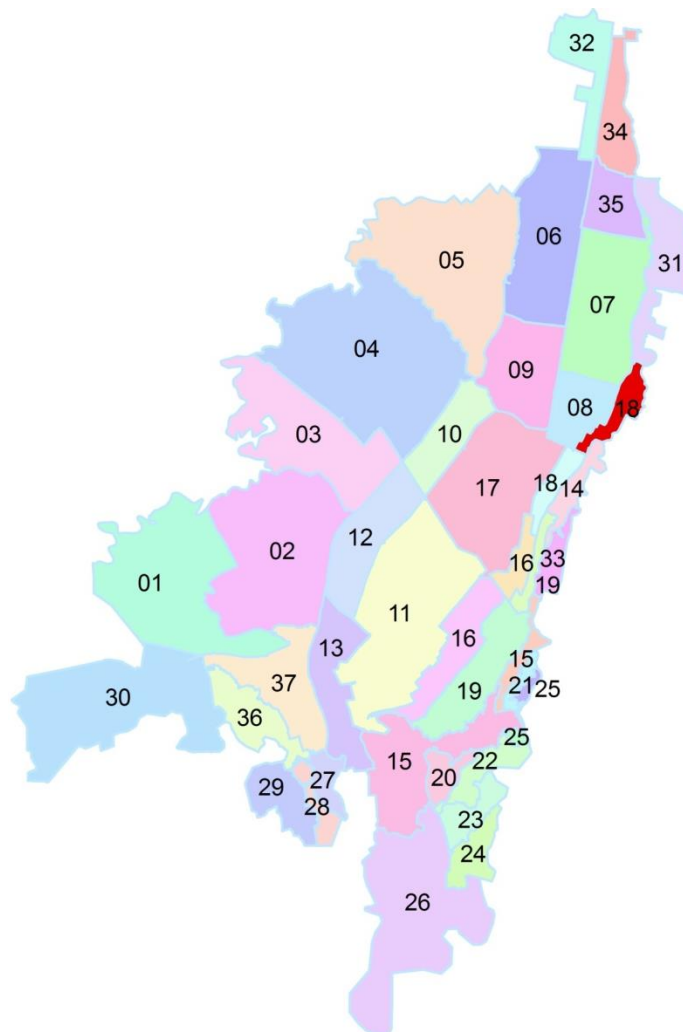
NO	COMPENENTE	CODIGO	BE (%)	BE (%)	BE (%)
1	Volumen de Entrada	Vin1	0.03	0	0
2	Agua Exportada	Vexp1	0.03	0	0
3	Consumo Doméstico Facturado Medido	Cdf1	0.03	0	0
4	Consumo No Doméstico Facturado Medido	Cndf1	0.03	0	0
5	Consumo Doméstico Facturado No Medido	Cdf2	0.03	0.03	0.03
6	Consumo No Doméstico Facturado No Medido	Cndf2	0.10	0	0
7	Consumo Doméstico No Facturado Medido	Cdnf1	0.03	0	0
8	Consumo No Doméstico No Facturado Medido	Cndnf1	0.03	0	0
9	Consumo Doméstico No Facturado No Medido	Cdnf2	0.20	0	0
10	Consumo No Doméstico No Facturado No Medido	Cndnf2	0.30	0	0
11	Consumo Autorizados No Facturados Medidos	Canf1	0.03	0	0
12	Consumo Autorizados No Facturados No Medidos	Canf2	0.20	0.20	0
13	Consumos de la Empresa	Ce1	0	0	0
13.1	Consumo Empresa. Daños	Ce1Dan	0.10	0.10	0
13.2	Consumo Empresa. Hidrantes	Ce1Hid	0.10	0	0
13.3	Consumo Empresa. Carrotanques	Ce1Ct	0.05	0	0
13.4	Consumo Empresa. Lavado Tanques	Ce1LTan	0.10	0	0
13.5	Consumo Empresa. Lavado Tuberías	Ce1LTub	0.10	0	0

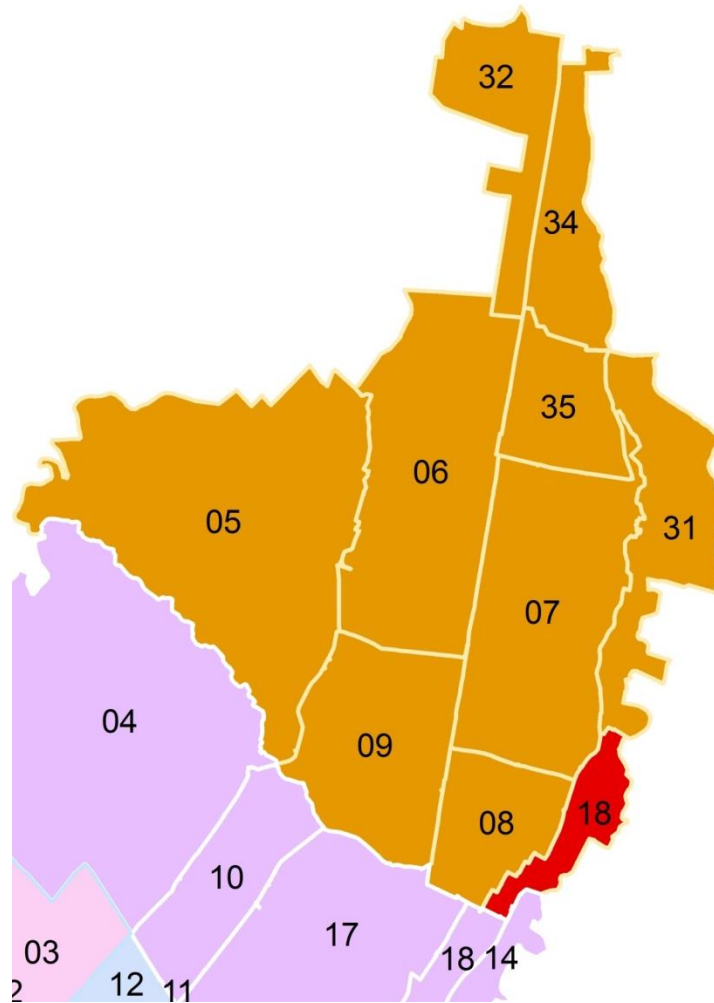
13.6	Consumo Empresa. Vactor.	Ce1Vac	0.10	0	0
14	Consumo de Conexiones Ilegales	Cil2	0	0	0
14.1	Conexiones Ilegales. Consumos Ilegales Masivos	Cil2CM	0.03	0.03	0.03
14.2	Conexiones Ilegales. Clandestinos Dispersos	Cil2CD	0.03	0	0
15	Consumo Fraudulento	CFr2	0.03	0	0
16	Errores de Medición	Err2	0.03	0	0

## 5. Modelación del Sistema

### 5.1 Reproducción cálculo del balance hídrico para una unidad hidráulica de Bogotá (Sector hidráulico)

#### 5.1.1 Selección del sector





### 5.1.2 Datos de entrada y datos estimados (Preprocesamiento de la información)

A continuación se presenta un esquema general de la estructura de entrada de datos necesaria para la realización de la desagregación del balance y la determinación de las correspondientes incertidumbres individuales y acumuladas:

• 0.BandadeConfianza.xlsx

No	Componente	Codigo	BE (%)	BE (%)	BE (%)
1	Volumen de Entrada	Vin1	0.03	0	0
2	Agua Exportada	Vexp1	0.03	0	0
3	Consumo Doméstico Facturado Medido	Cdf1	0.03	0	0
4	Consumo No Doméstico Facturado Medido	Cndf1	0.03	0	0
5	Consumo Doméstico Facturado No Medido	Cdf2	0.03	0	0
6	Consumo No Doméstico Facturado No Medido	Cndf2	0.10	0	0
7	Consumo Doméstico No Facturado Medido	Cdnf1	0.03	0	0
8	Consumo No Doméstico No Facturado Medido	Cdnf1	0.03	0	0
9	Consumo Doméstico No Facturado No Medido	Cdnf2	0.20	0	0
10	Consumo No Doméstico No Facturado No Medido	Cdnf2	0.30	0	0
11	Consumo Autorizados No Facturados Medidos	Canf1	0.03	0	0
12	Consumo Autorizados No Facturados No Medidos	Canf2	0.20	0.20	0
13	Consumos de la Empresa	Ce1			
13.1	Consumo Empresa. Daños	Ce1Dan	0.10	0.10	0
13.2	Consumo Empresa. Hidrantes	Ce1Hid	0.10	0	0
13.3	Consumo Empresa. Carrotanques	Ce1Ct	0.05	0	0
13.4	Consumo Empresa. Lavado Tanques	Ce1LTan	0.10	0	0
13.5	Consumo Empresa. Lavado Tuberías	Ce1LTub	0.10	0	0
13.6	Consumo Empresa. Vactor.	Ce1Vac	0.10	0	0
14	Consumo de Conexiones Ilegales	Cil2			
14.1	Conexiones Ilegales. Consumos Ilegales Masivos	Cil2CM	0.03	0.03	0.03
14.2	Conexiones Ilegales. Clandestinos Dispersos	Cil2CD	0.03	0	0
15	Consumo Fraudulento	CFr2	0.03	0	0
16	Errores de Medición	Err2	0.03	0	0

• 1.EntradaySalida2010.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1	NaN	NaN	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	
2	01/01/2010	viernes, 01 de enero de 2010	187.332	160.376	174.422	165.901	165.931	165.051	143.850	134.155	134.556	134.556	134.555	157.567	199.004	201.077	212.581	237.642	242.323	261.439	280.634	313.172	318.843		
3	02/01/2010	sábado, 02 de enero de 2010	275.667	274.605	272.781	270.439	272.181	222.333	222.275	222.339	222.853	225.612	242.580	266.902	239.011	264.989	302.891	346.846	386.624	408.001	424.857	458.559	486.606	518.971	
4	03/01/2010	domingo, 03 de enero de 2010	198.344	178.285	178.195	176.000	154.453	154.540	154.025	154.595	154.977	155.225	155.714	156.306	192.774	212.173	236.517	298.370	334.685	374.945	401.971	426.810	444.410	464.161	
5	04/01/2010	lunes, 04 de enero de 2010	190.690	174.308	167.809	167.361	167.417	167.793	153.349	146.911	147.573	152.001	166.803	198.028	263.777	331.061	383.884	467.633	544.003	587.927	622.811	648.966	666.128	681.302	
6	05/01/2010	martes, 05 de enero de 2010	238.714	223.013	213.721	205.757	205.923	206.455	195.301	189.914	190.208	199.795	204.770	229.142	287.480	365.404	425.457	480.186	536.224	573.138	620.757	644.475	655.315	648.919	
7	06/01/2010	miércoles, 06 de enero de 2010	222.666	206.594	192.921	185.626	182.448	162.428	162.624	163.126	163.708	164.069	190.766	212.319	270.166	344.688	403.615	463.746	507.207	556.395	589.597	607.132	625.118	648.761	
8	07/01/2010	jueves, 07 de enero de 2010	218.341	201.703	190.499	174.318	169.969	169.935	170.116	170.173	170.729	171.025	180.030	214.227	268.110	338.678	404.689	463.859	520.615	560.885	593.882	620.368	638.521	649.711	
9	08/01/2010	viernes, 08 de enero de 2010	207.606	191.798	181.679	176.417	170.720	171.242	171.284	171.613	171.547	172.791	173.361	213.617	268.890	337.560	409.825	464.738	525.865	571.231	605.885	632.243	653.693	665.634	
10	09/01/2010	sábado, 09 de enero de 2010	244.150	227.664	212.808	202.648	193.047	180.745	181.472	181.395	182.018	183.305	184.290	212.604	216.330	286.708	331.071	386.311	437.429	463.236	526.197	575.615	608.275	627.129	
11	10/01/2010	domingo, 10 de enero de 2010	205.434	188.274	184.421	186.849	186.495	186.201	186.530	154.571	149.812	163.075	184.055	184.761	204.442	241.773	272.715	303.085	343.185	378.213	419.676	449.951	470.759	486.162	
12	11/01/2010	lunes, 11 de enero de 2010	177.366	176.049	168.415	152.720	152.437	152.680	152.781	152.571	152.588	152.711	153.412	170.121	181.867	221.631	253.725	296.917	341.561	388.159	432.681	470.329	502.137	535.872	
13	12/01/2010	martes, 12 de enero de 2010	182.376	173.683	160.584	160.429	155.374	140.325	140.781	140.778	141.363	155.053	170.381	209.001	289.915	374.360	459.109	540.040	596.733	644.695	673.370	703.436	741.526	743.214	
14	13/01/2010	miércoles, 13 de enero de 2010	248.568	226.974	212.594	203.452	197.473	191.710	184.822	183.543	181.174	187.154	216.059	246.286	325.119	396.706	479.767	543.606	590.948	634.071	662.503	685.046	705.542	721.690	
15	14/01/2010	jueves, 14 de enero de 2010	232.220	210.094	184.438	173.935	165.976	163.748	158.329	160.022	153.874	176.329	201.627	235.147	329.002	416.534	492.458	558.463	612.229	642.060	678.063	695.166	709.482	728.901	
16	15/01/2010	viernes, 15 de enero de 2010	241.022	221.190	204.708	191.826	183.904	183.394	183.277	184.713	171.196	175.813	204.214	223.297	302.161	410.704	494.989	555.973	609.368	653.428	682.876	702.113	723.229	742.609	
17	16/01/2010	sábado, 16 de enero de 2010	254.653	234.028	223.081	207.536	198.081	187.894	184.868	178.228	181.089	236.355	241.560	283.668	383.715	346.743	417.394	472.262	517.873	569.548	624.656	669.683	697.645	714.324	
18	17/01/2010	domingo, 17 de enero de 2010	270.465	229.617	224.484	199.882	199.373	199.290	185.777	178.015	175.856	176.179	176.719	177.752	193.355	237.637	301.982	334.978	374.302	424.719	469.017	503.505	535.423	552.679	
19	18/01/2010	lunes, 18 de enero de 2010	217.433	208.694	193.994	175.071	170.954	170.637	171.000	171.148	178.038	207.662	231.886	276.116	339.852	437.341	515.462	578.732	640.351	688.317	715.178	725.535	731.407	732.916	
20	19/01/2010	martes, 19 de enero de 2010	227.571	210.130	193.794	188.750	179.613	165.545	166.358	166.487	167.175	216.633	263.811	289.573	365.051	463.174	543.848	606.648	657.288	688.980	704.646	714.097	721.322	720.643	
21	20/01/2010	miércoles, 20 de enero de 2010	237.084	210.671	196.577	181.574	181.936	177.941	181.035	161.526	161.678	168.466	196.321	237.606	335.803	450.991	536.449	602.978	649.509	682.565	705.426	716.112	720.076	720.903	
22	21/01/2010	jueves, 21 de enero de 2010	267.777	229.804	208.961	204.651	204.681	184.189	183.482	183.403	201.384	236.115	260.763	311.878	367.134	438.659	513.513	577.964	641.797	676.976	698.699	710.051	717.639	717.034	
23	22/01/2010	viernes, 22 de enero de 2010	260.214	237.372	230.042	211.852	188.591	188.981	189.485	190.143	190.395	191.080	206.793	260.407	343.685	448.830	526.178	588.810	652.813	695.100	709.390	716.590	722.222	723.713	
24	23/01/2010	sábado, 23 de enero de 2010	277.717	243.546	222.428	213.510	212.784	191.472	191.441	180.524	170.593	171.133	196.242	221.341	273.935	343.157	410.979	474.610	532.691	596.864	645.890	684.686	703.046	713.475	
25	24/01/2010	domingo, 24 de enero de 2010	374.465	354.586	341.583	331.135	322.188	322.954	317.665	301.978	302.257	302.964	304.365	306.225	361.290	353.228	316.712	363.118	402.815	451.386	504.573	546.673	583.920	608.743	
26	25/01/2010	lunes, 25 de enero de 2010	216.711	197.508	176.170	175.340	159.712	155.710	155.891	156.160	156.628	175.291	211.733	257.619	358.891	455.637	525.778	589.445	632.856	675.141	698.384	711.281	719.554	722.794	
27	26/01/2010	martes, 26 de enero de 2010	230.555	206.774	190.069	171.991	171.654	172.601	172.628	162.093	151.084	167.435	193.661	260.643	333.277	465.182	532.742	586.263	634.125	661.117	689.568	703.713	710.713	713.951	





1 No.	ENERO			FEBRERO			MARZO			ABRIL			MAYO		
	NCH>=3	CH exitosos	fCMO	NCH>=3	CH exitosos	fCMO	NCH>=3	CH exitosos	fCMO	NCH>=3	CH exitosos	fCMO	NCH>=3	CH exitosos	fCMO
1	12	3	2	12	3	2	12	3	2	12	3	2	12	3	2
2	4	1	1	4	1	1	4	1	1	4	1	1	4	1	1

• 3.ConsumosEmpresa2010.xlsx

GENERALES				FUGA TUBERIA					DESAGUE HIDRANTE					TOTAL		
Número	Fecha	Zona	Sector	Presión Promedio (mca)	Diámetro Aprox. Fuga (pulg)	Hora de Reporte de Daño	Hora de Reparación de Daño	Tiempo de Fuga (min)	Caudal Fuga (lps)	Volumen Fuga (m3)	Presión Promedio (mca)	Diámetro desague (pulg)	Tiempo de descarga (min)	Caudal Hidrante (lps)	Volumen (m3)	Volumen por Daño a Tubería (m3)
3	1 05/01/2010	3	18	20	1	05/01/2010 0:00	05/01/2010 1:00	30	9.089	32.7	20	2	10	36.3540647	21.8124388	54.53109
4	2 20/01/2010	3	18	15	1	20/01/2010 0:00	20/01/2010 0:30	30	7.871	14.2	15	2	10	31.4835436	18.8901262	33.05772
5	3 04/02/2010	3	18	10	1	04/02/2010 0:00	04/02/2010 1:00	60	6.427	23.1	10	2	10	25.7062057	15.4237234	38.55930
6	4 19/02/2010	3	18	18	1	19/02/2010 0:00	19/02/2010 1:00	60	8.622	31.0	18	2	10	34.488494	20.6930964	78.22884
7	5 06/03/2010	3	18	21	1	06/03/2010 11:00	06/03/2010 13:00	120	9.313	67.1	21	2	5	37.2518311	11.1755493	78.22884
8	6 21/03/2010	3	18	25	1	21/03/2010 14:00	21/03/2010 17:00	180	10.161	109.7	25	2	8	40.64508	19.5096384	129.2513
9	7 05/04/2010	3	18	12	1	05/04/2010 16:00	05/04/2010 17:00	60	7.040	25.3	12	2	10	28.1597375	16.8558425	42.23960
10	8 20/04/2010	3	18	25	1	20/04/2010 15:30	20/04/2010 17:00	90	10.161	54.9	25	2	11	40.64508	26.8257528	81.69661
11	9 05/05/2010	3	18	22	1	05/05/2010 0:00	05/05/2010 17:00	1020	9.532	583.4	22	2	2	38.1284648	4.57541577	587.9409
12	10 20/05/2010	3	18	23	0	20/05/2010 0:00	20/05/2010 17:00	1020	0.000	0.0	23	2	5	39.9853912	11.6956174	11.69561
13	11 04/06/2010	3	18	24	1	04/06/2010 16:00	04/06/2010 17:00	60	9.956	35.8	24	2	6	39.8238826	14.3365977	50.17809
14	12 19/06/2010	3	18	25	1	19/06/2010 14:00	19/06/2010 17:00	180	10.161	109.7	25	2	8	40.64508	19.5096384	129.2513
15	13 04/07/2010	3	18	25	0	04/07/2010 0:00	04/07/2010 17:00	1020	0.000	0.0	25	2	4	40.64508	9.7548192	9.75481
16	14 19/07/2010	3	18	26	1	19/07/2010 14:00	19/07/2010 17:00	180	10.363	111.9	26	2	3	41.4500112	7.46100202	119.3760
17	15 03/08/2010	3	18	26	1	03/08/2010 16:00	03/08/2010 17:00	60	10.363	37.3	26	2	4	41.4500112	9.94800269	47.25301
18	16 18/08/2010	3	18	30	0	18/08/2010 0:00	18/08/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	9	44.5244543	24.0432053	24.04320
19	17 02/09/2010	3	18	30	0	02/09/2010 0:00	02/09/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	4	44.5244543	10.685869	10.6858
20	18 17/09/2010	3	18	30	0	17/09/2010 0:00	17/09/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	4	44.5244543	10.685869	10.6858
21	19 02/10/2010	3	18	30	0	02/10/2010 0:00	02/10/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	5	44.5244543	13.3573363	13.35733
22	20 17/10/2010	3	18	30	0	17/10/2010 0:00	17/10/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	7	44.5244543	18.7002708	18.70027
23	21 01/11/2010	3	18	30	0	01/11/2010 0:00	01/11/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	8	44.5244543	21.3717381	21.37173
24	22 16/11/2010	3	18	30	0	16/11/2010 0:00	16/11/2010 17:00	1020	0.000	0.0	30	2	10	44.5244543	26.7146726	26.71467

- 4.CIlegalesyFraud2010.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	No.	ENERO			FEBRERO			MARZO			ABRIL			MAYO		
2		Npspc	Predios exitosos	fcmo	Npspc	Predios exitosos	fcmo	Npspc	Predios exitosos	fcmo	Npspc	Predios exitosos	fcmo	Npspc	Predios exitosos	fcmo
3	1	15	8	18	15	8	18	15	8	18	15	8	18	15	8	18
4	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																

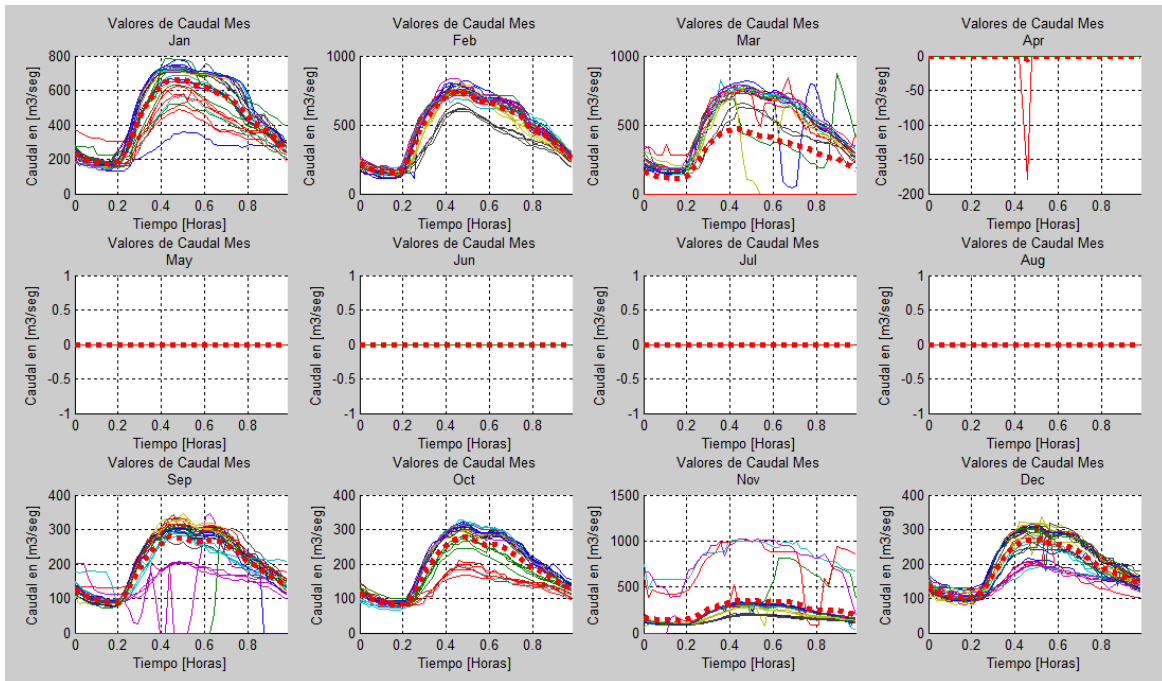
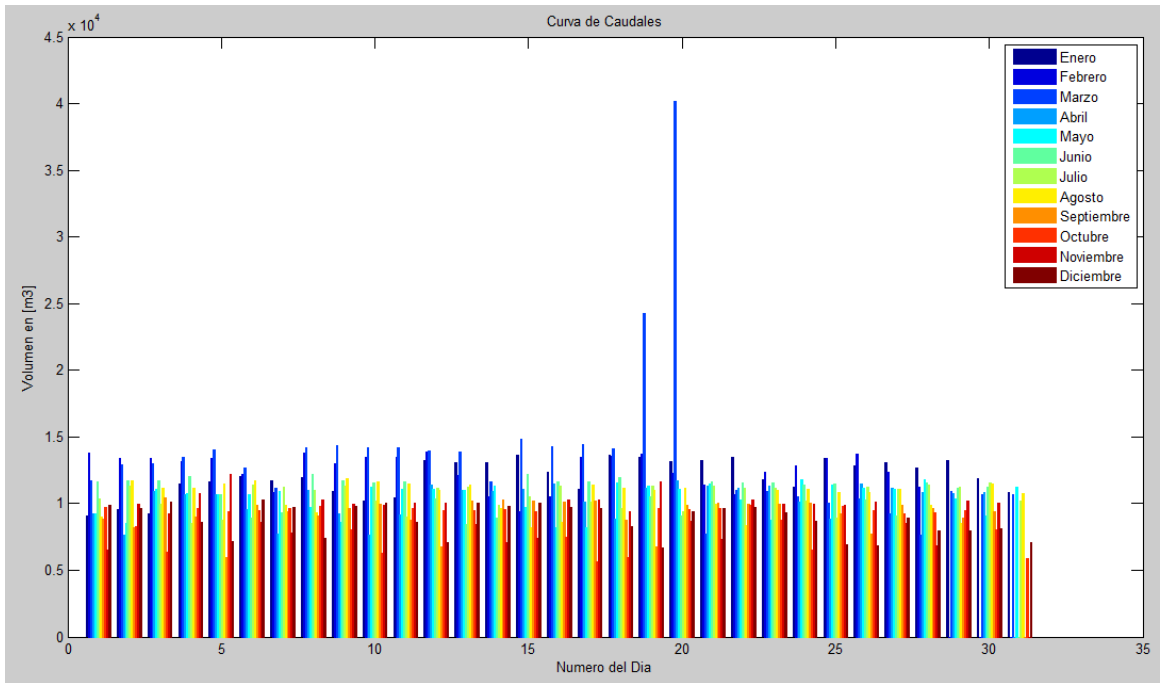
### 5.1.3 Procesamiento información macromedición

Completar información

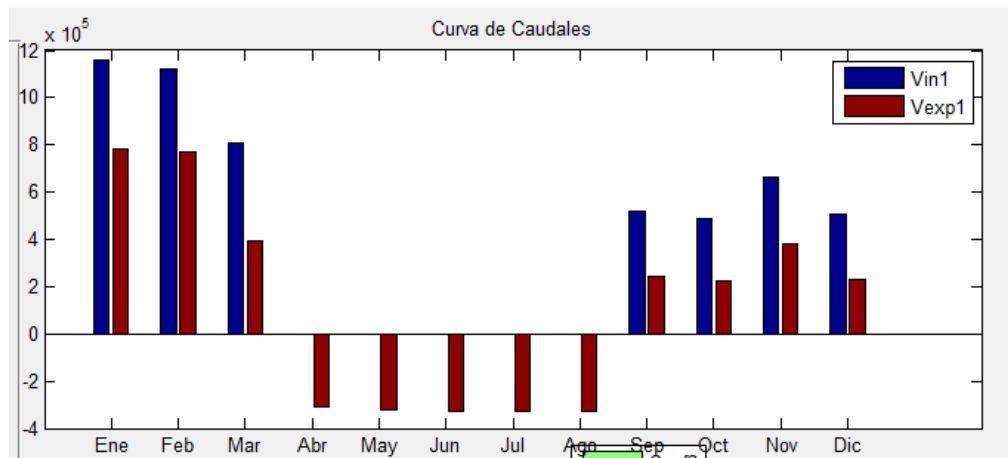
Hallar atípicos

Desviaciones o comportamiento irregular

Validación manual de datos



### Cálculo de volúmenes de entrada

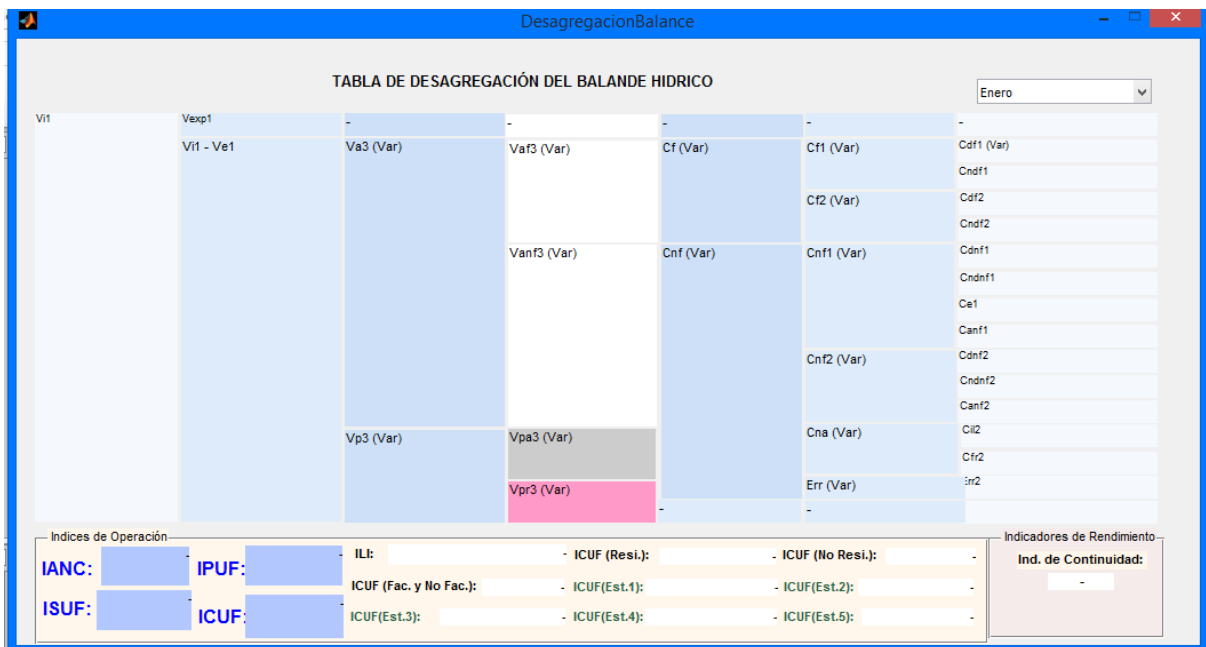
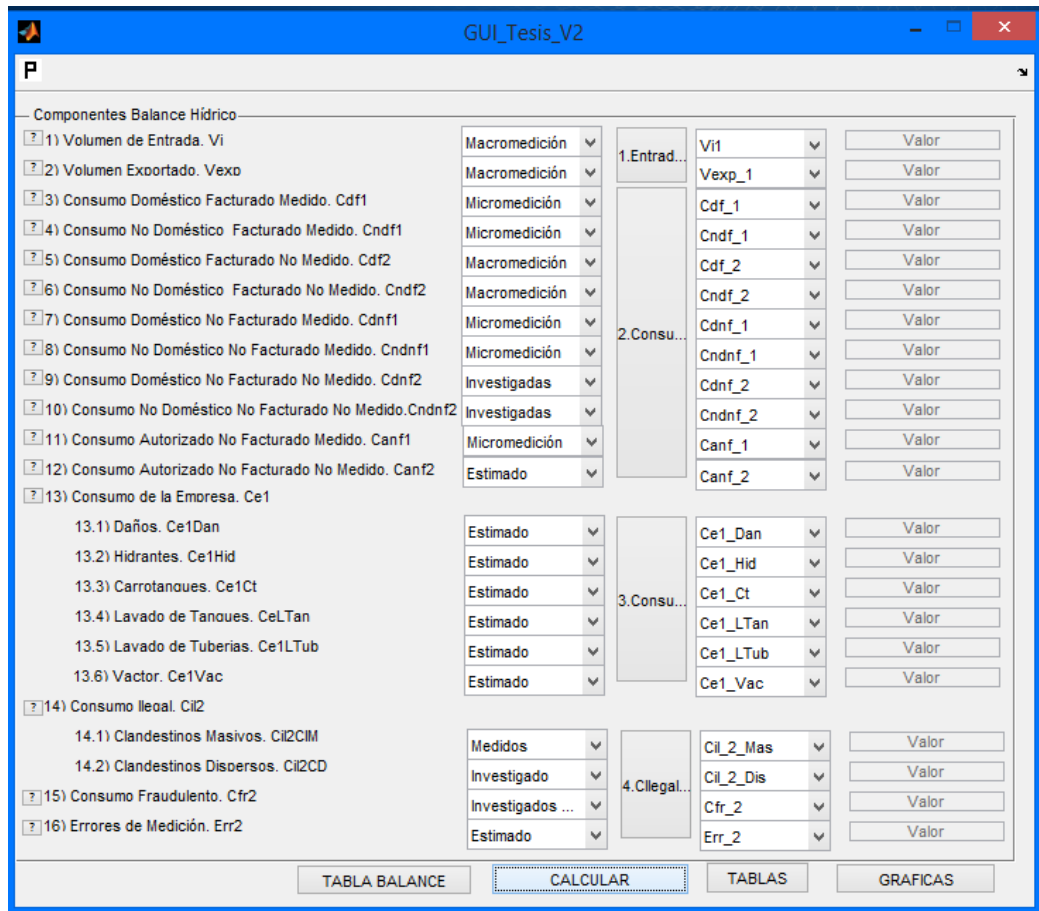


## **5.1.4 Desarrollo aplicativo - Desarrollo de software aplicación amigable con el usuario**

Cálculo de caudales y volúmenes

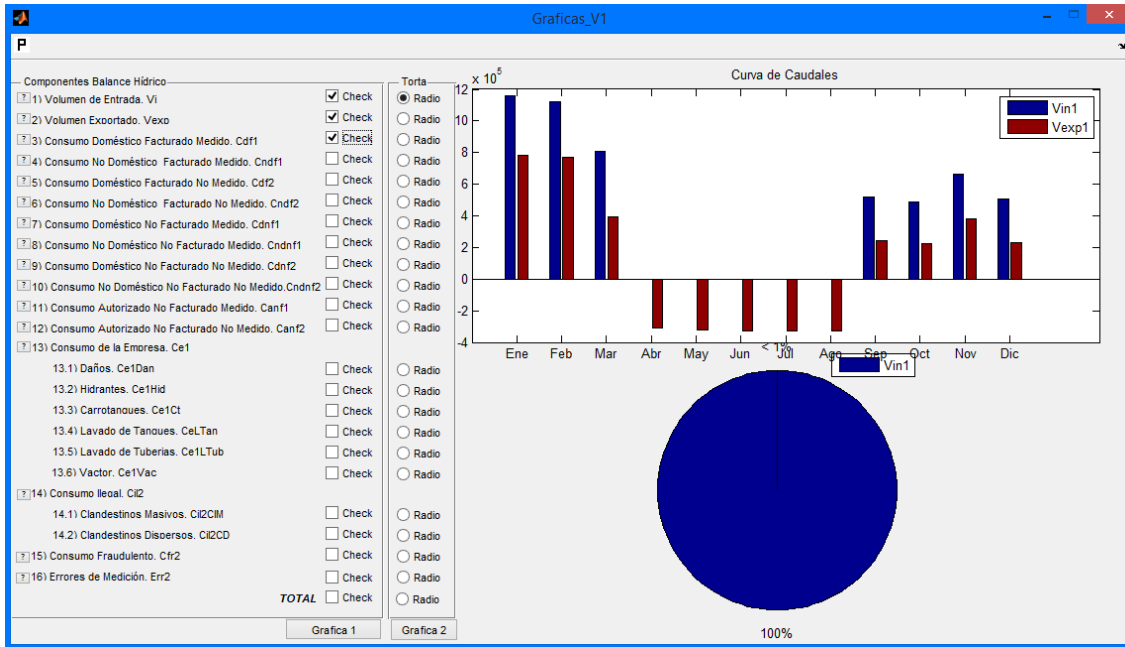
Estimación de indicadores

### 5.1.5 Aplicativo



VALORES DE COMPONENTES VOLUMEN (m3) POR MES																
	Enero	Feb	Marz	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dici	TOTAL	Calculado	Relativo	
Vin1	1.1578e+06	1.1206e+06	8.0865e+05	0	0	0	0	0	5.1800e+05	4.9096e+05	6.8562e+05	5.0376e+05	5.2654e+06	5.2654e+06	0.0107	1.9
Vexp1	7.8542e+05	7.6931e+05	3.9184e+05	-3.0882e+05	-3.2397e+05	-3.2860e+05	-3.2700e+05	-3.2740e+05	2.4117e+05	2.2277e+05	3.8422e+05	2.3080e+05	1.4098e+06	1.4098e+06	0.0188	9.7
Cdf1	1.0226e+05	9.1562e+04	1.0098e+05	9.6057e+04	9.8460e+04	9.2605e+04	9.4597e+04	9.5071e+04	9.2194e+04	9.9700e+04	9.7677e+04	1.0142e+05	1.1626e+06	1.1626e+06	37.8098	5.2
Cdnf1	7.3228e+04	6.4953e+04	7.3372e+04	6.8813e+04	6.9546e+04	6.9505e+04	7.2484e+04	6.7763e+04	6.6230e+04	7.1203e+04	6.3366e+04	6.5348e+04	8.2581e+05	8.2581e+05	178.9790	1.6
Cdf2	7.5298e+04	6.7836e+04	7.4958e+04	7.2404e+04	7.4980e+04	7.2345e+04	7.4931e+04	7.5070e+04	7.2453e+04	7.4278e+04	7.2902e+04	7.5074e+04	8.8253e+05	8.8253e+05	1.1891	1.2
Cdnf2	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	66000	66000	48.1761	1.0
Cdnf1	434	448	434	448	434	448	434	448	434	448	434	448	5292	5292	18.3673	8.0
Cndnf1	1100	440	660	440	660	0	440	880	880	1100	220	7480	7480	16.8367	5.4	
Cdnf2	312.2649	278.2481	310.7391	292.5252	297.7070	289.4819	298.8345	288.3213	279.9471	295.8857	275.8819	284.5666	3.5044e+03	3.5044e+03	23.1474	
Cndnf2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Canf1	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	14640	14640	7.0808	1.8
Canf2	190	155	257	177	162	131	179	198	265	259	237	283	2493	2493	0	
Ce1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ce1Dan	87.5888	90.2920	207.4802	123.9362	599.6365	179.4294	129.1309	71.2962	21.3717	32.0576	48.0864	48.0864	1.6384e+03	1.6384e+03	81.7507	
Ce1Hid	43.0726	43.0442	39.7729	48.2814	0	0	0	0	0	0	0	0	174.1711	174.1711	28.3700	
Ce1Ct	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122	198	1100	1100	83.5893	
Ce1LTan	31.6003	34.4816	37.1397	39.6197	41.9532	44.1635	46.2683	48.2814	50.2138	52.0745	53.8709	84.0493	563.7163	563.7163	83.5638	
Ce1LTub	48.5271	53.4293	53.4293	53.4293	80.1440	53.4293	53.4293	106.8587	26.7147	0	0	0	529.3912	529.3912	67.8216	
Ce1Vac	298	233	206	274	245	229	260	212	296	261	325	368	3207	3207	85.4162	
Cl2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cl2CM	1.4046e+04	1.2652e+04	1.3979e+04	1.3495e+04	1.3971e+04	1.3472e+04	1.3948e+04	1.3974e+04	1.3487e+04	1.3839e+04	1.3581e+04	1.3988e+04	1.6443e+05	1.6443e+05	2.6450	9.8
<b>C. Domésticos</b>																
<b>C. No Domésticos</b>																
<b>C. Empresa</b>																
<b>C. Autorizados</b>																
<b>C. Ilegales</b>																

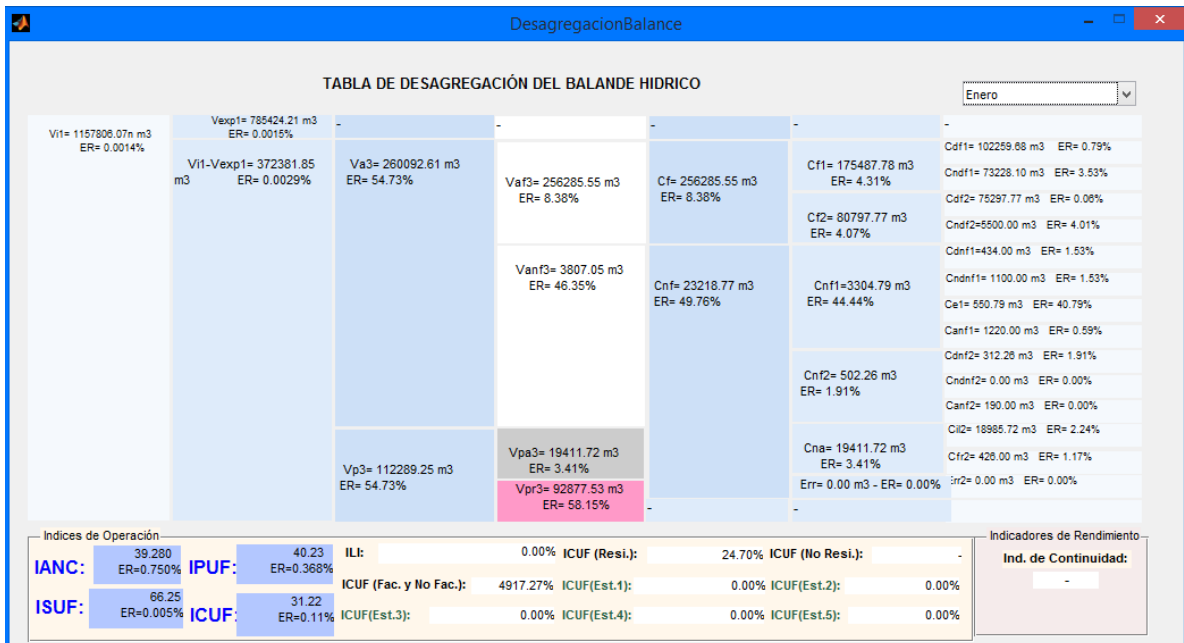
VALORES DE COMPONENTES ERROR RELATIVO (%) POR MES																
	Enero	Feb	Marz	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dici	TOTAL	Calculado	Relativo	
Vin1	0.0014	0.0016	0.0017	0	0	0	0	0	0.0014	0.0014	0.0017	0.0014	0.0107	5.2654e+06	0.0107	1.9
Vexp1	0.0015	0.0017	0.0025	0.0014	0.0013	0.0014	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	0.0021	0.0014	0.0188	1.4098e+06	0.0188	9.7
Cdf1	0.7862	1.5477	1.3260	2.7952	1.9033	4.3370	2.7117	5.4925	3.3841	6.5364	3.3742	3.6155	37.8098	1.1626e+06	37.8098	5.2
Cdnf1	3.5261	6.3342	5.9055	9.4416	8.5675	37.6423	9.8270	17.2374	15.2014	19.9072	19.0245	26.3645	178.9790	8.2581e+05	178.9790	1.6
Cdf2	0.0565	0.0678	0.0629	0.0865	0.0706	0.1615	0.0838	0.1363	0.0980	0.1634	0.0972	0.1045	1.1891	8.8253e+05	1.1891	1.2
Cdnf2	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	4.0147	48.1761	66000	48.1761	1.0
Cdnf1	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	18.3673	5292	18.3673	8.0
Cndnf1	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	0	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	1.5306	16.8367	7480	16.8367	5.4
Cdnf2	1.9662	1.9668	1.9652	1.9112	1.9131	1.9081	1.9132	1.9153	1.9200	1.9602	1.9890	1.9990	23.1474	3.5044e+03	23.1474	
Cndnf2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Canf1	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	0.5901	7.0808	14640	7.0808	1.8
Canf2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2493	0	
Ce1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ce1Dan	5.2367	5.1530	6.2925	5.5070	9.7309	6.5740	8.7188	6.3794	7.0711	7.1686	7.1146	6.8041	81.7507	1.6384e+03	81.7507	
Ce1Hid	7.0716	7.0763	7.1506	7.0714	0	0	0	0	0	0	0	0	28.3700	174.1711	28.3700	
Ce1Ct	7.0791	7.0767	7.0753	7.0743	7.0736	7.0732	7.0728	7.0725	7.0723	7.0722	7.0720	5.7753	83.5893	1100	83.5893	
Ce1LTan	7.0731	7.0725	7.0721	7.0719	7.0717	7.0716	7.0715	7.0714	7.0714	7.0713	7.0713	5.7739	83.5638	563.7163	83.5638	
Ce1LTub	7.1071	7.0711	7.0711	7.0711	7.4536	7.0711	7.0711	7.9057	10	0	0	0	67.8216	529.3912	67.8216	
Ce1Vac	7.2225	7.1694	7.5135	7.1537	7.1694	7.4800	7.1543	7.1723	7.1123	7.0985	7.0751	6.0953	85.4162	3207	85.4162	
Cl2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cl2CM	0.2139	0.2491	0.2139	0.2246	0.2139	0.2247	0.2139	0.2140	0.2247	0.2139	0.2246	0.2138	2.6450	1.6443e+05	2.6450	9.8
<b>C. Domésticos</b>																
<b>C. No Domésticos</b>																
<b>C. Empresa</b>																
<b>C. Autorizados</b>																
<b>C. Ilegales</b>																



### 5.1.6 Modelación de escenarios. Análisis de sensibilidad

### 5.1.7 Presentación de resultados

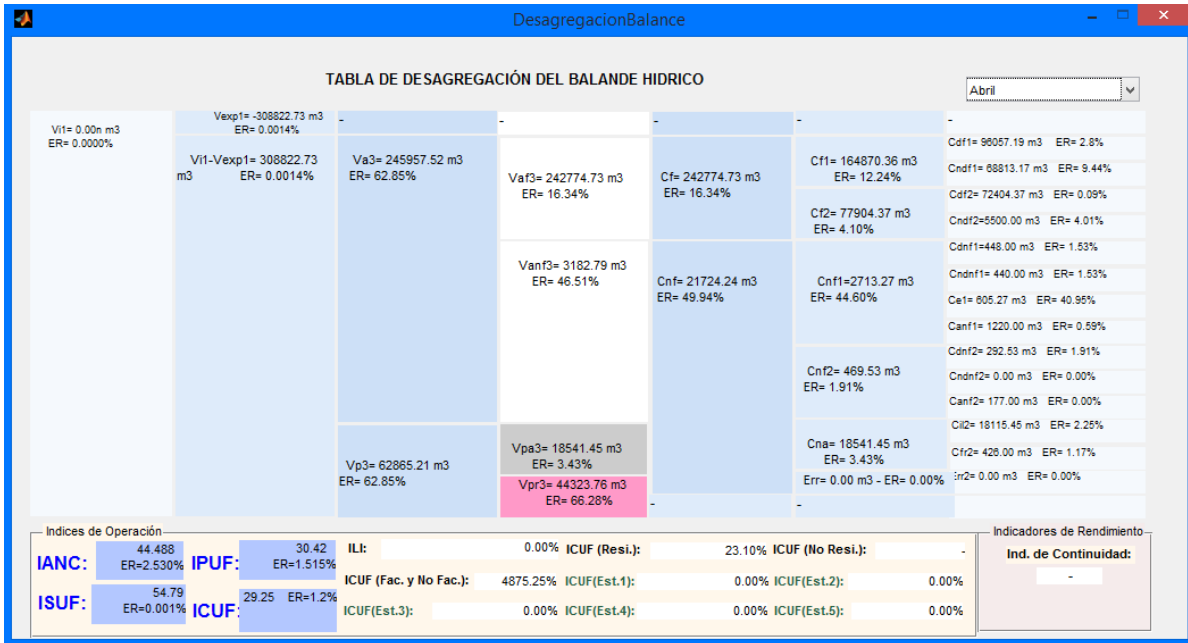
#### Enero



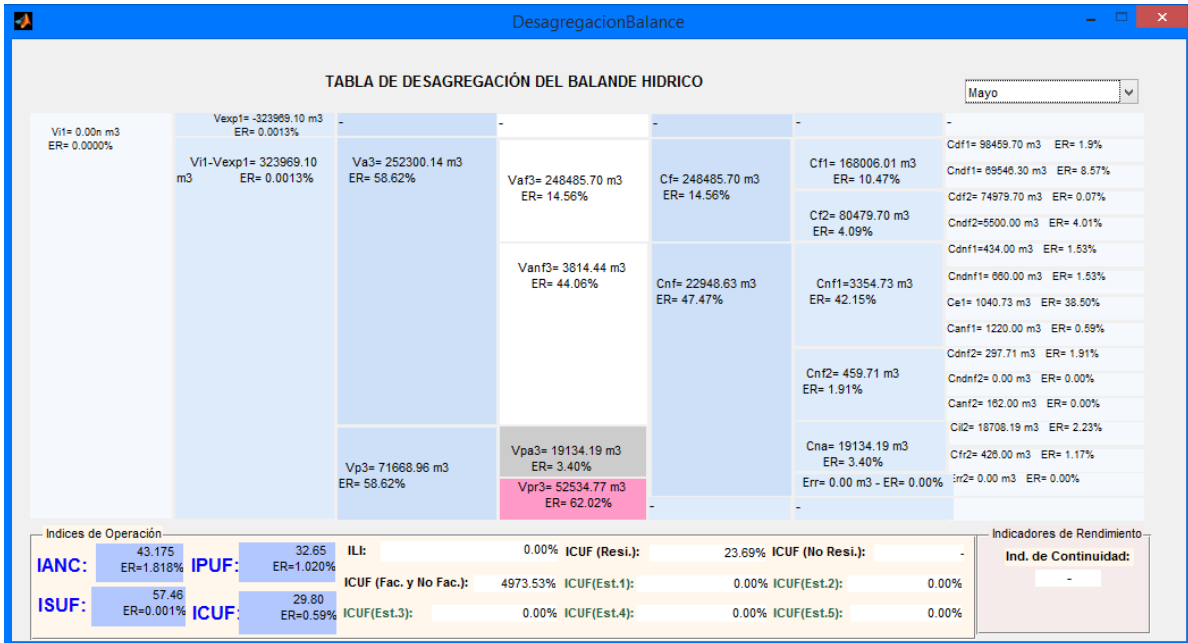




**Abril**



**Mayo**



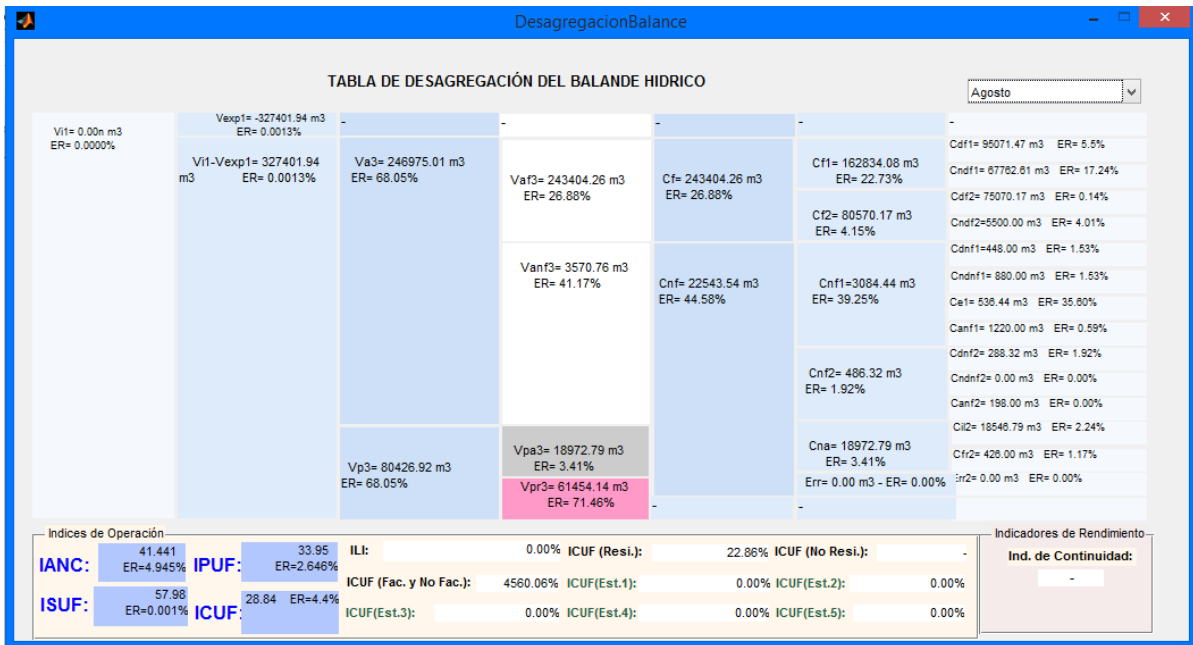
Junio

DesagregacionBalance										
TABLA DE DESAGREGACIÓN DEL BALANDE HIDRICO										
Junio										
Vf1= 0.00n m3 ER= 0.0000%	Vexp1= -328599.58 m3 ER= 0.0014%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Vf1-Vexp1= 328599.56 m3 ER= 0.0014%	Va3= 242631.85 m3 ER= 85.45%	Vaf3= 239955.35 m3 ER= 46.16%	Cf= 239955.35 m3 ER= 46.16%	Cf1= 162110.29 m3 ER= 41.98%	Cdf1= 92605.13 m3 ER= 4.3%	Vf1-Vexp1= 328599.56 m3 ER= 0.0014%	Va3= 242631.85 m3 ER= 85.45%	Vaf3= 239955.35 m3 ER= 46.16%	Cf= 239955.35 m3 ER= 46.16%	
		Vanf3= 2676.50 m3 ER= 39.30%	Cnf= 21048.32 m3 ER= 42.77%	Cf2= 77845.06 m3 ER= 4.18%	Cdf2= 72345.06 m3 ER= 0.18%					
				Cnf1=2256.02 m3 ER= 37.39%	Cndf1=448.00 m3 ER= 1.53%					
				Cnf2= 420.48 m3 ER= 1.91%	Cndf2=5500.00 m3 ER= 4.01%					
				Cna= 18371.82 m3 ER= 3.47%	Cndf1=0.00 m3 ER= 0.00%					
		Vp3= 85967.71 m3 ER= 85.46%	Vpa3= 18371.82 m3 ER= 3.47%	Err= 0.00 m3 - ER= 0.00%	Ce1= 588.02 m3 ER= 35.27%					
			Vpr3= 67595.90 m3 ER= 88.93%		Canf1= 1220.00 m3 ER= 0.59%					
					Cdnf2= 289.48 m3 ER= 1.91%					
					Candf2= 0.00 m3 ER= 0.00%					
					Canf2= 131.00 m3 ER= 0.00%					
					Cil2= 17945.82 m3 ER= 2.30%					
					Cfr2= 428.00 m3 ER= 1.17%					
					irr2= 0.00 m3 ER= 0.00%					
Indicadores de Operación					Indicadores de Rendimiento					
IL: 0.00%	ICUF (Resi.): 22.37%	ICUF (No Resi.): -	Ind. de Continuidad: -							
IANC: 41.265 ER=5.967%	IPUF: 34.34 ER=3.069%	ICUF (Fac. y No Fac.): 5079.95%	ICUF(Est.1): 0.00%	ICUF(Est.2): 0.00%						
ISUF: 58.46 ER=0.001%	ICUF: 28.84 ER=6%	ICUF(Est.3): 0.00%	ICUF(Est.4): 0.00%	ICUF(Est.5): 0.00%						

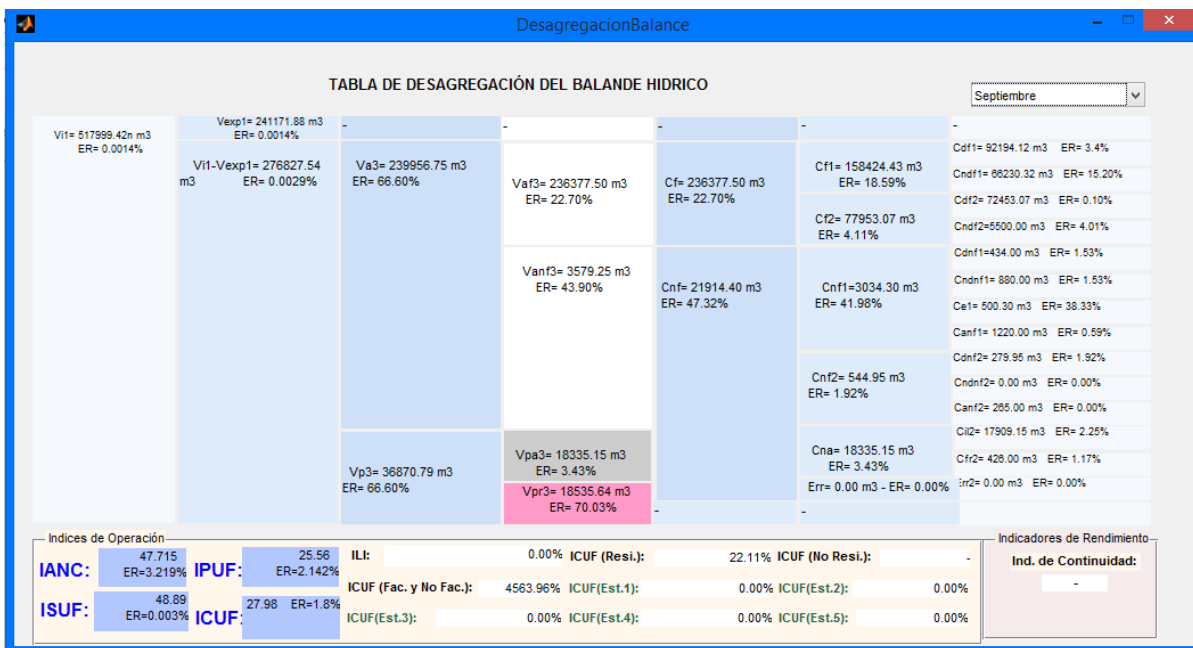
Julio

DesagregacionBalance										
TABLA DE DESAGREGACIÓN DEL BALANDE HIDRICO										
Julio										
Vf1= 0.00n m3 ER= 0.0000%	Vexp1= -328996.59 m3 ER= 0.0013%	-	-	-	-	-	-	-	-	
Vf1-Vexp1= 328996.59 m3 ER= 0.0013%	Va3= 250662.39 m3 ER= 59.29%	Vaf3= 247511.73 m3 ER= 16.64%	Cf= 247511.73 m3 ER= 16.64%	Cf1= 167080.91 m3 ER= 12.54%	Cdf1= 94597.26 m3 ER= 2.7%	Vf1-Vexp1= 328996.59 m3 ER= 0.0013%	Va3= 250662.39 m3 ER= 59.29%	Vaf3= 247511.73 m3 ER= 16.64%	Cf= 247511.73 m3 ER= 16.64%	
		Vanf3= 3150.66 m3 ER= 42.65%	Cnf= 22092.55 m3 ER= 46.14%	Cf2= 80430.81 m3 ER= 4.10%	Cdf2= 74930.81 m3 ER= 0.08%					
				Cnf1=2672.83 m3 ER= 40.74%	Cndf1=434.00 m3 ER= 1.53%					
				Cnf2= 477.83 m3 ER= 1.91%	Cndf2=5500.00 m3 ER= 4.01%					
				Cna= 18941.88 m3 ER= 3.49%	Cndf1=0.00 m3 ER= 0.00%					
		Vp3= 76334.20 m3 ER= 59.29%	Vpa3= 18941.88 m3 ER= 3.49%	Err= 0.00 m3 - ER= 0.00%	Ce1= 578.83 m3 ER= 37.09%					
			Vpr3= 57392.32 m3 ER= 62.78%		Canf1= 1220.00 m3 ER= 0.59%					
					Cdnf2= 298.83 m3 ER= 1.91%					
					Candf2= 0.00 m3 ER= 0.00%					
					Canf2= 179.00 m3 ER= 0.00%					
					Cil2= 18615.88 m3 ER= 2.32%					
					Cfr2= 428.00 m3 ER= 1.17%					
					irr2= 0.00 m3 ER= 0.00%					
Indicadores de Operación					Indicadores de Rendimiento					
IL: 0.00%	ICUF (Resi.): 22.84%	ICUF (No Resi.): -	Ind. de Continuidad: -							
IANC: 42.830 ER=2.452%	IPUF: 33.24 ER=1.397%	ICUF (Fac. y No Fac.): 5089.54%	ICUF(Est.1): 0.00%	ICUF(Est.2): 0.00%						
ISUF: 58.14 ER=0.001%	ICUF: 29.71 ER=1.1%	ICUF(Est.3): 0.00%	ICUF(Est.4): 0.00%	ICUF(Est.5): 0.00%						

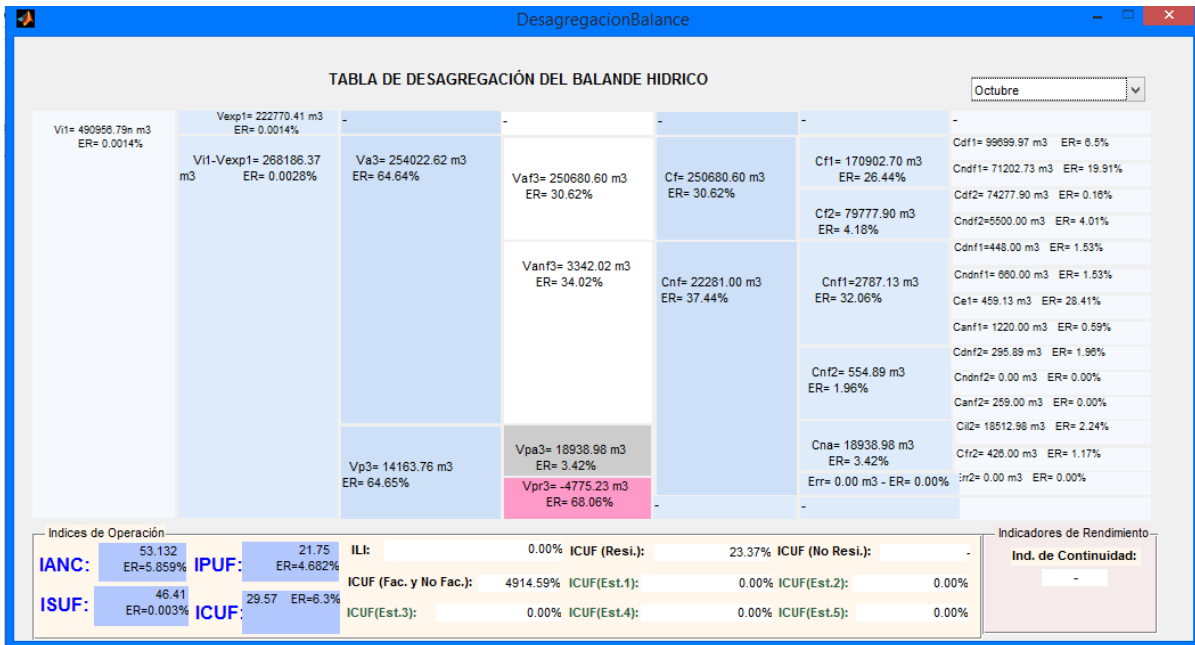
Agosto



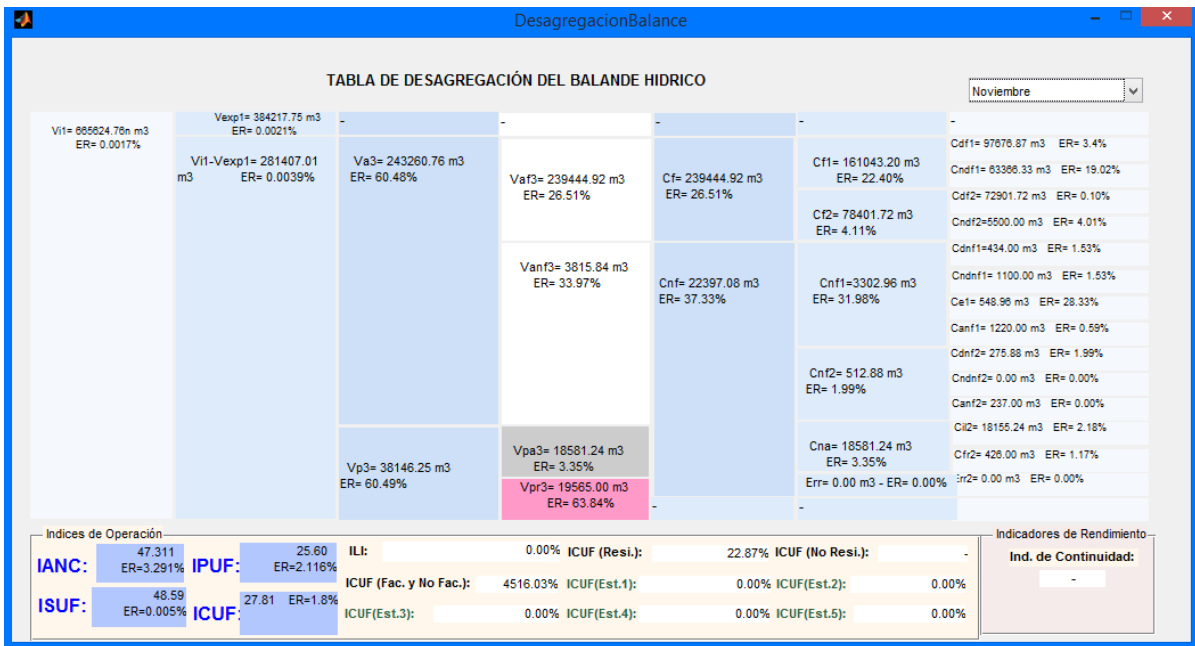
Septiembre



Octubre



Noviembre





- Entre menor sea el tiempo entre lecturas de consumo menor es la incertidumbre del consumo doméstico y no doméstico no facturado. Su implementación necesita de la aplicación de criterios de beneficio costo, ya que su aplicación implica altos costos de personal y logística.
- Es posible determinar volúmenes mensuales de facturación a partir de volúmenes de bimensuales mediante un cálculo sencillo de interpolación, sin embargo, su aplicación requiere de cuidado y contar con toda la información necesaria, tales como vigencias, estrato de la misma y sobre todo de garantizar la armonización de los ciclos de facturación con la sectorización.

### **Consumo doméstico facturado no medido $Cdf_2$**

De acuerdo a la expresión de incertidumbre que define esta componente se puede establecer que:

- De igual forma que en los volúmenes de entrada y salida, el factor de conversión de unidades incrementa la incertidumbre en este valor y un mayor número de mediciones la reduce.
- Menores índices de agua no contabilizada de redes no oficiales o menores pérdidas físicas dentro del área del Ciclo hacen reducir la incertidumbre de este consumo.
- A mayor número de suscriptores de este grupo de usuarios mayor es la incertidumbre del cálculo.
- Es posible que la determinación de este consumo este subestimada en tanto que dentro del área de asentamiento Ciclo I, no todos los usuarios deciden reportarse ante la empresa, por tanto es altamente probable que el  $N_{sus\_ciclo\ I}$  sea menor que el número real de suscriptores y por tanto la incertidumbre global de este término también lo sea.
- Puesto que este término considera el consumo por usuarios facturado determinado a partir de los volúmenes facturados, tanto domésticos como no domésticos, guarda sus características. Es decir, si las lecturas de facturación son tomadas con menor distancia temporal entre sí, menor va a ser la incertidumbre global de este consumo.

**Consumos  $C_{ndf_2}$ ,  $C_{ndf_1}$ ,  $C_{anf_1}$ ,  $C_{ndf_2}$ ,  $C_{anf_2}$** 

De acuerdo a las expresiones de incertidumbre que definen estas componentes se puede establecer que:

- La incertidumbre global está directamente ligada a la incertidumbre individual de cada una de las estimaciones de consumos individuales y estas a su vez están sujetas a la confiabilidad del método de determinación, cuyo significado es dado por la banda de estimación.
- En el caso de los valores medidos la banda de estimación es más sencilla de asignar puesto que depende directamente de la precisión y exactitud del instrumento de medición.

**Consumo doméstico no facturado no medido  $C_{dnf_2}$  y  $C_{dis}$** 

De acuerdo a la expresión de incertidumbre que define esta componente se puede establecer que:

- Al igual que el consumo es incrementado en la medida que sean encontrados conjuntos habitacionales o usuarios clandestinos dispersos con puntos de consumo sin facturar y considerablemente altos, así mismo se verá incrementada su incertidumbre.
- Aunque no es tenida en cuenta dentro del cálculo es importante anotar que existe incertidumbre adicional en este consumo dado que no se puede asegurar que se han encontrado todos los conjuntos habitacionales o usuarios clandestinos dispersos con puntos de consumo sin facturar, seguramente habrán predios de este tipo que se dejaran de considerar. Su incertidumbre puede ayudar a reducirse en la medida en que los monitoreos sean constantes y eficientes.
- Entre mayor sea el número de cuentas contrato facturables en el sector estudiado y menor el consumo que estos realicen menor será la incertidumbre global de este consumo.
- Otra fuente de incertidumbre para este valor es el hecho de que se tome el consumo por usuario facturado del sector para asignárselo a un consumo de una naturaleza muy diferente como lo es un punto de consumo comunal que perfectamente podría tomarse como un consumo no doméstico.



**Agua utilizada por la empresa de agua  $Ce_1$** 

De acuerdo a la expresión de incertidumbre que define esta componente se puede establecer que el diámetro de desagüe o fuga dependiente del caso añade un alto grado de incertidumbre al valor global.

**Consumo a través de conexiones ilegales  $Cil_2$** 

De acuerdo a la expresión de incertidumbre que define esta componente se puede establecer que:

Clandestinos masivos

- Un alto número de predios masivos aumenta el valor de la incertidumbre global de este consumo.
- De igual forma un alto consumo por usuario facturado en el sector aumenta la incertidumbre global del consumo.
- Un menor índice de pérdidas de redes no oficiales dará como resultado una incertidumbre global menor.



## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Se definió un modelo conceptual estructurado que permite entender claramente el flujo de datos, variables y constantes en cada una de las componentes de cálculo del balance hídrico definido por la IWA de forma que es posible aplicarlo a cualquier sistema de acueducto con características similares a las de Bogotá o por lo menos en uno donde se cuente con los principales componentes de este balance: volúmenes de entrada, salida y facturación o consumos.

Se desarrolló una metodología para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación global del balance hídrico basada en un análisis por componentes, producto de esto se elaboró un aplicativo que permite la reproducción del cálculo del balance y la incertidumbre de cada una de las componentes que la conforman ayudando de esta manera a las empresas de servicios públicos de agua a determinar la confiabilidad de las cifras que manejan y por consiguiente a tomar mejores decisiones.

El aplicativo es una gran herramienta que gracias a su diseño le permite al usuario llevar la información de todo su sistema de forma ordenada, modelar diferentes escenarios y alternativas, visualizar la información de forma más sencilla y dicente para realizar mejores análisis y por tanto tomar mejores decisiones.

Esta herramienta también permite a las entidades de regulación y control como la comisión de regulación de servicios públicos comparar estándares de eficiencia basados en elementos de juicio más equitativos, ya que aunque los indicadores de eficiencia dan una buena idea del nivel de mejora de las empresas, es la incertidumbre quien le da confiabilidad y validez a tales reportes.

Se ha aplicado toda la metodología de cálculo de incertidumbre al sector 18 del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá y los resultados a nivel de incertidumbre global de indicadores como el IANC y el IPUF son significativamente importantes, así como el análisis detallado presentado del mismo con base en el análisis de sensibilidad realizado, cuyas conclusiones son un valioso aporte a la EAAB E.S.P.

## 6.2 Recomendaciones

El presente trabajo se constituye como una puerta muy importante en la línea de investigación de gestión del agua. Son múltiples los problemas que se dan al interior de las empresas de servicios públicos del agua y aunque muchas parecen sencillas carecen del correcto enfoque que les brinde el camino a la solución. A partir de esta investigación se requiere:

- Investigar más sobre la incertidumbre real en medidores de diferentes clases y demás usados en la EAAB E.S.P
- Realizar estudios sobre submedición en medidores domiciliarios.
- Realizar análisis geoestadísticos que optimicen la detección de usuarios fraudulentos y reduzcan los altos costos que estos presuntivamente generan.
- Crear herramientas para realizar análisis económicos de los programas de control de pérdidas que permitan a las empresas tomar mejores decisiones.
- Reproducir el cálculo de la incertidumbre con la herramienta desarrollada en la presente investigación pero a toda Bogotá. Esto requiere de la modificación del aplicativo.
- Reproducir el cálculo de la incertidumbre con la herramienta desarrollada en la presente investigación para diferentes sectores y realizar cálculo por zonas.
- Reproducir el cálculo de la incertidumbre con la herramienta desarrollada en la presente investigación para diferentes años y revisar la evolución de los indicadores en el tiempo.

# **Anexos**

Desarrollo de programación (Desarrollo de algoritmos, rutinas y subrutinas) - Protocolo de modelación

# Bibliografía

[1] BILL KINGDOM, ROLAND LIEMBERGER, PHILIPPE MARIN. The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. Water supply and sanitation sector board discussion paper series. Paper No.8. December 2006. Banco Mundial.

[2] PEREZ GONZALO. ¿Por qué Medir y para qué? Marzo de 2004. Disponible en: ([http://www.degerencia.com/articulo/por\\_que\\_medir\\_y\\_para\\_que](http://www.degerencia.com/articulo/por_que_medir_y_para_que))

[3] JIMENEZ ALDANA MAURICIO. La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto. Premio Diódoro Sánchez 2003, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Diciembre de 2003.

[4] KANAKOUDIS V.; TSITSIFLI S. Results of an urban water distribution network performance evaluation attempt in Greece. Civil Engineering Department, University of Thessaly, Pedion Areos, 38334, Volos, GRECE. Urban water journal. ISSN 1573-062X. 2010, vol. 7, no5, pp. 267-285 [19 page(s) (article)] (1 p.)

[5] CRIMINISI, FONTANAZZA CM, FRENI G, LOGGIA GL. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. Water Sci Technol. 2009. AMAP S.p.A., Via Volturmo, 2, 90100, Palermo, Italy. [antonio.criminisi@amapspa.it](mailto:antonio.criminisi@amapspa.it)

[6] GONZALEZ-CASTRO, J. AND MUSTE, M. (2007). "Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat Using Standardized Uncertainty Analysis," Special Issue on Acoustic Velocimetry for Riverine Environments, J. Hydr. Engrg., 133(12), pp. 1390-1411.

[7] THORNTON, J., STURM, R. Y KUNKEL, G., Water Loss Control. McGraw-Hill, 2008.

[8] FANNER, P., Assessing real water losses: a practical approach. Water 21 - Magazine of the International Water Association, pp 49-50, 2004.

[9] WARREN, R., CUNNINGHAM, A., Leakage methodology review: variation in per capita consumption estimates. Dorking, Reino Unido, 2007.

[10] MUTSCHMANN, J. Y STIMMELMAYR, F., Taschenbuch der Wasserversorgung. Braunschweig, Vieweg, 1999.

[11] THE GERMAN WATER LOSS GUIDELINES. DVGW W392, 2003.

[12] THORNTON, J., STURM, R. Y KUNKEL, G., Water Loss Control. McGraw-Hill, 2008.

[13] FARLEY, M., Leakage Management and Control. WHO, 2001.

[14] ALEGRE, H., BAPTISTA, J.M., CABRERA, E., CUBILLO, F., DUARTE, P., HIRNER, W., MERKEL, W. Y PARENA, R., Performance Indicators for Water Supply Services. IWA Publishing. Londres, 2007.

[15] LAMBERT, A. O., Assessing Non-Revenue Water and its Components - a practical approach. Water 21 - Magazine of the International Water Association, Vol. Agosto 2003, pp. 50-51, 2003.

[16] S. GIL Y E. RODRÍGUEZ. Teoría de errores. Incertezas de medición. Física re-Creativa.

[17] LAMBERT, A. O., BROWN T.G., TAKIZAWA M. Y WEIMER D., A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua 48, pp. 227-237, 1999.



[18] COMISION DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Nivel de pérdidas aceptable para el cálculo de los costos de prestación de los servicios públicos domiciliarios y de acueducto y alcantarillado. Febrero de 2013.

[19] Seguimiento Plan de Control de Perdidas. Versión 3, 2009 EAAB, Oficina de Planeamiento.

[20] EAAB E.S.P - Manual de Macromedición 3GD050510-02. 2006