

Modelación bajo ambiente de fugas y su correlación entre el diseño, la construcción, la operación y las pérdidas técnicas y comerciales en un sistema de distribución de agua potable

1. Introducción



La sectorización y la administración de presiones, temáticas asociadas al control y reducción de pérdidas técnicas y comerciales en un sistema de distribución de agua potable, son una práctica cada vez más frecuente en nuestro medio donde las empresas operadoras realizan grandes inversiones, pero sin obtener en la mayoría de las veces los resultados esperados. Pese a que las nuevas ideas se tratan de aplicar cada vez con mayor intensidad, aún persisten vacíos y desconocimientos que parten desde la conceptualización misma del diseño, la forma como se construye el sistema y la práctica operativa, donde cada especialista en su respectivo campo, realiza el mejor esfuerzo posible pero en forma aislada como si se tratase de partes que operaran totalmente independientes. En Colombia, el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000 constituye la normativa que señala los requisitos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos operativos a utilizarse en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo y sus actividades complementarias; actualmente se adelanta la actualización de este reglamento y se espera la inclusión de nuevas orientaciones y especificaciones que permitan el desarrollo de estrategias

innovadoras de intervención en los sistemas de distribución de agua para el control y reducción de pérdidas. En el presente documento, se pretende mostrar en primera instancia, las generalidades en el abordaje conceptual sobre la gestión de pérdidas de agua en sistemas de distribución de agua potable propuesto por diversas instituciones y expertos a nivel local y global. Así mismo, se plantea una breve discusión acerca de la correlación e integralidad existente entre las etapas de diseño y/o diagnóstico, construcción y/o rehabilitación y operación de los sistemas de distribución de agua potable; se proponen además, los lineamientos generales bajo los cuales se debe dar la integralidad de nuevos conceptos en cada una de las tres etapas de la implementación de dichos sistemas y que puedan contribuir a una mayor eficiencia y aprovechamiento de las inmensas inversiones que se realizan en esta parte del sector de agua potable. Finalmente, se propone un método de campo investigativo para la determinación de los valores reales de los coeficientes y exponentes emisores (K, X), y a través de ellos llegar a la diferenciación más precisa de las pérdidas técnicas y comerciales en un sistema de distribución de agua potable.

“Las pérdidas de agua no sólo representan una pérdida económica y el desperdicio de un recurso valioso y escaso, sino también, un riesgo para la salud pública...sus problemáticas se acentúan cada vez más como resultado del crecimiento poblacional, deficiencias en la gestión y gobernabilidad del recurso y otros aspectos como el cambio climático”.



Si bien lo que aquí se conceptúa se propone aplicar en un sistema de acueducto relativamente pequeño, sus conceptos y aplicaciones son totalmente válidos para cualquier sistema de distribución de agua potable de cualquier tamaño, siempre que se cuente con las herramientas de sectorización y de administración de presiones tal como se ha estado implementando en las redes de distribución de las grandes ciudades. De hecho también es importante mencionar que la sola sectorización y administración de presiones con toda la tecnología asociada (Macromedidores, válvulas reguladoras, registradores de presión, centros de control, etc.) no son de por sí suficientes para obtener los mejores resultados en términos de disminución de pérdidas técnicas, si no se aplican técnicas más avanzadas en la diferenciación entre las pérdidas técnicas y comerciales y los conceptos que interrelacionan los parámetros respectivos en su etapa de diseño, construcción y operación.

En lo que respecta a la parte práctica que materializa el abordaje conceptual de este documento, se presenta el apoyo al sector de agua potable en el municipio de Roldanillo por parte del gobierno departamental, a través de la empresa VALLECAUCANA DE AGUAS S.A. E.S.P., como gestora del Programa Agua y Saneamiento para la Prosperidad - Plan Departamental de Agua – PAP-PDA, con la ejecución del sistema de acueducto con la más alta y moderna tecnología que existe en la región, por un valor cercano a \$3.835 millones, el cual tiene como objetivo satisfacer la demanda de agua potable a cerca de 700 familias de las poblaciones de Morelia-Higuerón e Higueroncito durante un periodo mínimo de 25 años. Se describen las obras de infraestructura de este sistema de acueducto pionero en la región, el cual cuenta con estándares técnicos de alta calidad que mediante una administración y operación adecuadas, permitirá lograr un volumen de agua no contabilizada - VANC y niveles de pérdidas técnicas menores a los promedios registrados para los sistemas de acueducto existentes en el país.



Corregimiento de Higuercito
Municipio de Roldanillo - Valle del Cauca

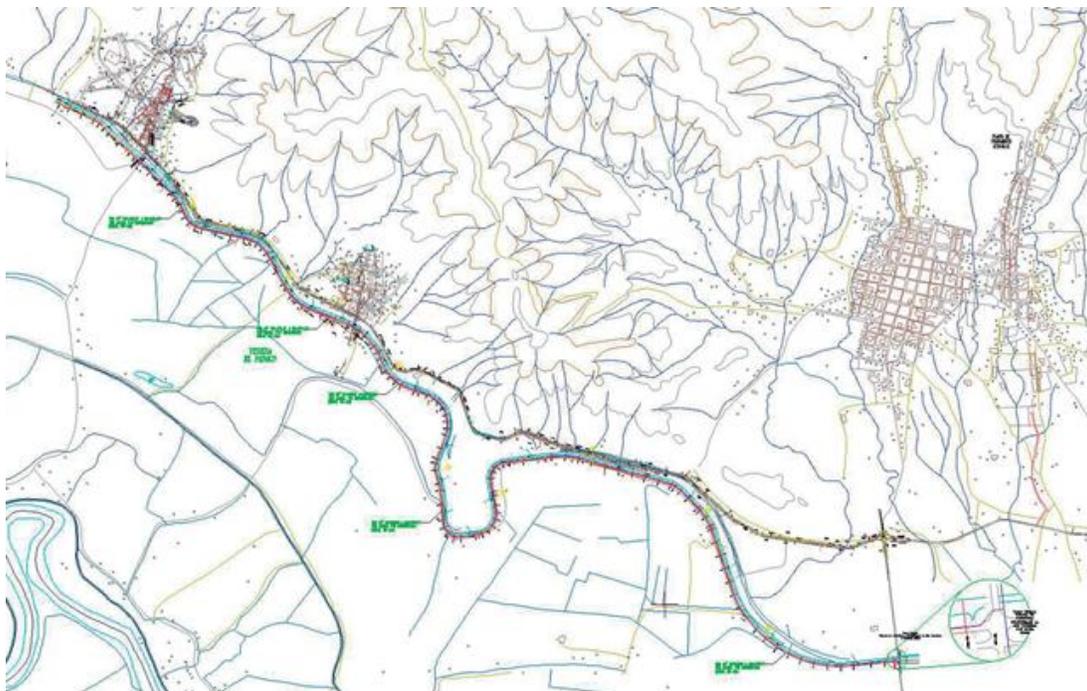


Figura 1. Plano General Proyecto: Construcción Acueducto de los Corregimientos de Morelia, Higuercón e Higuercito en el Municipio de Roldanillo-Departamento del Valle”

2. Aspectos teóricos y conceptuales

La disminución de la disponibilidad de fuentes de agua para consumo humano es uno de los problemas ambientales más importantes que enfrentan los países en la actualidad; situación que se ha agravado por sucesos como el cambio climático y el aumento en la tasa de crecimiento poblacional, especialmente en los países en desarrollo, surgiendo la necesidad urgente de una gestión eficaz del recurso hídrico en articulación con el desarrollo sostenible (Lee y Schwab, 2005; Khatri y Vairavamoorthy, 2007). Complementario a los múltiples factores socioeconómicos, culturales, ambientales, políticos y demás, relacionados con la cobertura, cantidad, calidad y continuidad del suministro de agua para consumo humano a nivel mundial, la problemática de disponibilidad del recurso hídrico se constituye en un tema de interés para las personas prestadoras del servicio de agua potable, puesto que aunque este servicio se considera una tarea prioritaria, se evidencian limitaciones que constituyen desafíos de gran importancia, destacándose entre estos, la disminución del volumen de agua no contabilizada - VANC. En términos generales, el volumen de agua no contabilizada VANC se define como “la diferencia entre la cantidad de agua suministrada a la red de distribución y la cantidad de agua facturada a los usuarios” (Kingdom et al., 2006). A nivel mundial, el VANC, o pérdidas de agua es asombroso. De acuerdo con Kingdom et al. (2006) y Farley et al. (2008), cada año, más de 32 mil millones de m³ de agua tratada se pierden por fugas en las redes de distribución; se estima que en este periodo de tiempo, 16 mil millones de m³ adicionales de agua se suministran al consumidor pero no son facturados por aspectos como deficiencia en la dosificación, conexiones fraudulentas, entre otros. Los autores anotan que en algunos países de bajos ingresos estas pérdidas representan entre el 50 y 60% del agua suministrada, con un promedio global estimado en 35%; sólo la mitad de esta cantidad podría abastecer de agua a 100 millones de personas con limitaciones de inversión en el sector.

La mayoría de los países desarrollados tienen una infraestructura sólida y cuentan con prácticas operacionales constituidas para la gestión y control de VANC. Sin embargo, este no es siempre el caso en los países en desarrollo; existe un esfuerzo en asegurar un suministro razonable de agua potable para el usuario en un escenario poco favorable: redes de tubería inadecuadas, sistemas de registro insuficientes y bajo nivel de conocimientos técnicos y disponibilidad de tecnología; adicionalmente, el sistema tarifario y de recaudo generalmente no reflejan la verdadera magnitud del agua suministrada, limitando la recuperación del costo y utilidad y animando a los usuarios a subvalorar el servicio (Farley et al., 2008). Bajo este escenario, la brecha entre los sofisticados programas de reducción del VANC predominantes en países con altos ingresos respecto a la

situación del suministro de agua en los países en desarrollo, continua su amplitud a un ritmo acelerado (Liemberger y Farley, 2004).

Como un registro puntual en las limitaciones de carácter técnico y su diferentes matices a nivel mundial, es pertinente citar una compilación realizada por Lee y Schwab (2005), quienes mostraron que para finales de los 90s, las fracturas de tuberías en Minsk (Bielorrusia) y Bogotá, (Colombia), se estimaron en aproximadamente 70 y 187 unidades por cada 100 km por año respectivamente, en comparación con el promedio de 17 unidades por cada 100 km por año en EE.UU, resaltando que este tipo de datos generalmente hacen referencia únicamente a las pérdidas visibles en los componentes de la infraestructura del acueducto. Liemberger y Farley, (2004) manifiestan que hasta hace alrededor de 30 años, la gestión de fugas se basaba más en un proceso de “guesstimation” que en el uso de la ciencia, lo que se puede interpretar en que éstas se estimaban a partir de información parcial y/o inadecuada, conllevando a posibles conjeturas. Los autores, citando el caso del Reino Unido, resaltan que en los últimos años, ésta situación ha cambiado drásticamente debido a la presión de tipo normativo ejercida sobre las empresas prestadoras del servicio de agua y a los significativos avances en el entendimiento de los aspectos relacionados con las pérdidas de agua, la posibilidad de estudiarlas bajo simulación y la comprensión de sus implicaciones económicas.

A pesar de algunos avances alentadores, es evidente que una gran parte de los sistemas de suministro de agua en el mundo siguen presentando altos niveles de pérdidas de agua y uno de los aspectos que fomentó esta situación, se identificó en la falta de un enfoque estándar para la evaluación y reporte de indicadores en la gestión de fugas, por lo que la International Water Association - IWA planteó una estructura y terminología estándar sintetizada en una Matriz de Balance de Agua (Ver Tabla 1). De esta manera, en muchos países como Colombia, se ha identificado a la Matriz de Balance de Agua como una herramienta fundamental en la determinación del nivel de eficiencia de los prestadores del servicio de acueducto con relación a las pérdidas de agua, pues permite clasificarlas adecuadamente y permite definir exactamente que pérdidas están fuera de su control y cuales son resultado de su gestión (CRA, 2007).

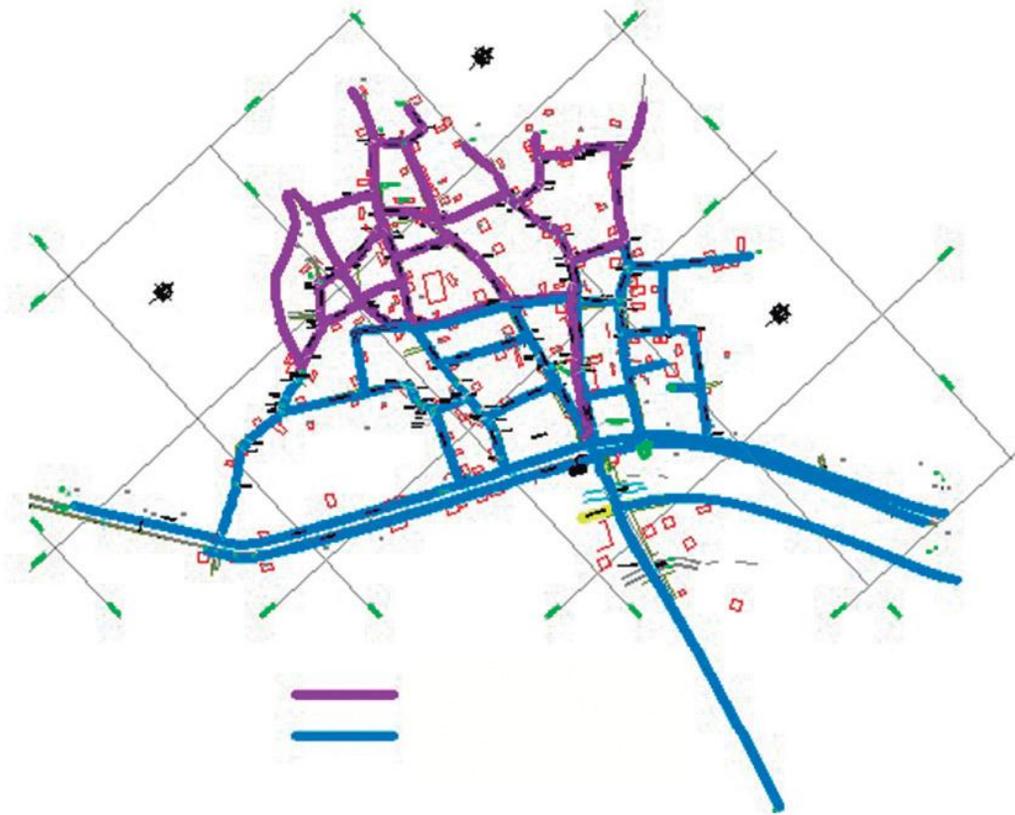


Figura 2. Esquema General Sectorización Corregimiento de Higueroncito

Tabla 1. Matriz de Balance de Agua propuesta por el IWA*

PRODUCCIÓN NETA	Consumo Legal	Consumo Legal Facturado	Consumo Facturado Medido	Facturación	Agua Facturada
			Consumo Facturado No Medido		
		Consumo Legal No Facturado	Consumo No Facturado Medido	Pérdida Comercial	
			Consumo No Facturado No Medido		
	Pérdidas de agua	Pérdida No Técnica	Consumo ilegal	Pérdida Comercial	
			Errores Medición y Facturación		
		Pérdida Técnica	Fugas Transmisión y Distribución	Pérdida Técnica	
			Vertimientos Tanques Almacenamiento		
Fugas Conexiones a Medidores Clientes					

Fuente: CRA, (2007). *Adaptación al español del International Water Balance propuesto por el IWA

3. Debilidades y falencias del estado actual en los diseños, procesos de construcción, operación y normatividad de las redes de distribución de agua potable

Se resumen a continuación las falencias y debilidades bajo las cuales se están diseñando, construyendo y operando los sistemas de redes de distribución de agua potable en nuestro medio. En primer lugar son muy pocos los diseños que se realizan bajo ambiente de fugas a pesar de disponer de las herramientas que ya lo permiten como el mismo EPANET y otros software aún más sofisticados. El tema es simple pero el error es grave y es suponer que las pérdidas técnicas admisibles, que el RAS 2000 permite hasta en un 25%, se sumen a la demanda del usuario y al valor así obtenido se le aplica una curva de consumo o demanda horaria. De esta manera se está suponiendo que las fugas o pérdidas técnicas son también un consumo y que se comportan bajo el mismo patrón de demanda que ejercen los usuarios. Es claro por supuesto que las pérdidas técnicas son una función exponencial de la presión existente en un nudo dado y la forma y área de la fisura que la ocasiona. Es conocido por todos que las fugas son mayores en la noche cuando la presión es mayor y cuando la demanda es mínima. En la etapa de construcción, a excepción del diámetro de la tubería, el tipo de material y otra gran cantidad de especificaciones normatividad como el tipo de cimentación, ancho de zanja, tipo de relleno, etc., no existe nada que correlacione el grado de pérdidas supuestas en el diseño y que como tal pudiese exigírsele al constructor el debido cumplimiento, en forma similar a como se le exige el cumplimiento del resto de normas de las otras especificaciones establecidas. En la etapa de construcción la práctica es que el constructor somete la tubería (sin estar conectadas las domiciliarias la mayoría de las veces) a las presiones de prueba establecidas en la norma exigiéndole completa estanqueidad. Hasta aquí todo parece ir bien, luego en un proceso posterior viene la instalación de las domiciliarias donde las redes son perforadas tantas veces como usuarios existan. La práctica operativa ha demostrado que la mayor proporción de las pérdidas técnicas están en las domiciliarias y no directamente en las redes. En cuanto a aspectos normativos, el RAS 2000 actual, establece un valor máximo de pérdidas técnicas que se debe tener en cuenta en el diseño, pero sin estar asociado a un valor de presión determinado.

Es muy diferente que se exija por ejemplo un nivel máximo de pérdidas técnicas del 20% a una presión de 15 m.c.a (metros de columna de agua), que ese mismo valor de pérdidas del 20% pero a una presión de 60 m.c.a. Para un constructor por supuesto sería menos exigente el cumplimiento del primer caso si hipotéticamente existiera esa normatividad. En este aspecto por lo tanto, en el RAS 2000 en proceso de actualización debería establecerse el nivel máximo de

pérdidas técnicas asociadas o en función de niveles de presión, porque con definir solo un valor porcentual, realmente se está evaluando la problemática de manera parcial. Finalmente el operador que está en el final de la cadena, recibe un sistema sin ningún protocolo de cómo fue diseñado el sistema de distribución y bajo qué requerimientos fue construido, y comienza de cero a realizar en la mejor forma posible su práctica operativa de administración de presiones y control de las pérdidas técnicas y comerciales. Su mayor dificultad reside en que no dispone de un método directo para diferenciar las pérdidas técnicas de las comerciales, y en el mejor de los casos utiliza la Matriz de Balance de Agua propuesta por el IWA, pero al final siempre tiene que suponer algunos valores y dependiendo de si se trata de un técnico operativo o de uno del área comercial, carga más la balanza hacia uno y otro lado. La mayoría de los casos, las empresas operadoras de una forma simplista lo que acostumbran reportar es un 50% para cada una de ellas y de esa manera solucionan el impase. El problema grave de esta falta de precisión en la diferenciación entre las pérdidas técnicas y comerciales es que los administradores no disponen de los elementos y criterios necesarios para aplicar los recursos donde realmente se requiere, obteniéndose entonces pobres resultados en las actividades de gestión encaminadas hacia la disminución de dichas pérdidas. Para agravar más la situación y completar este oscuro panorama no tan alentador, la gestión técnica, operativa y comercial de una empresa de acueducto, y en general toda su gestión integral y gerencial, se mide con el peor indicador que se haya podido definir para este propósito, y es el denominado Indicador de Agua No Contabilizada (IANC), medido como la relación porcentual entre un Volumen Total de Agua No contabilizada – VANC y el Volumen Total de agua distribuida, calculado en un período dado, normalmente un mes, o el acumulado de un año, según la siguiente expresión:

$$\text{IANC} = [(Vd - Vf) / Vd] \times 100$$

donde:

IANC

es el porcentaje total de Agua No Contabilizada.

Vd

es el volumen total distribuido en un período dado

Vf

es el volumen total facturado en el mismo período definido.

En Colombia, el IANC ha sido el indicador de pérdidas establecido por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 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. Aunque a nivel mundial existe una preferencia en el uso del IANC como indicador para cuantificar el progreso en la reducción del VANC, sus resultados pueden resultar engañosos (Farley et al., 2008). Este indicador “perverso” como lo han redefinido algunos especialistas que conocen del tema, no mide realmente lo que se desea evaluar, como tampoco sirve para llevar un seguimiento de la gestión técnica operativa y comercial de una empresa, ni para compararlo con diferentes ciudades y ni siquiera para compararlo con sectores pertenecientes a un mismo sistema, básicamente por los siguientes aspectos que se describen a continuación.

Específicamente, el IANC no tiene en cuenta la diferenciación entre pérdidas técnicas y comerciales. De otro lado, debido a que el Vd aparece tanto en el numerador como en el denominador, es posible modificar el resultado del indicador sin que se haya modificado el VANC, es decir sin que se haya hecho gestión para disminuirlo. De hecho esto está ocurriendo en la actualidad como consecuencia del uso racional del agua que cada vez los usuarios aplican con mayor exigencia. En general en todos los municipios del Valle del Cauca, el consumo promedio por suscriptor ha disminuido en un 30% en la última década, al pasar de un consumo de más de 20 metros cúbicos por suscriptor al mes, a solo 14 y menos. Esto hecho, por supuesto disminuye el Vd, pero la diferencia entre el Vd y el Vf, que es el VANC, no se modifica porque las pérdidas técnicas y comerciales siguen siendo las mismas, independientemente de que los usuarios consuman más o menos agua. Si por uso racional de agua se disminuye el Vd en esa misma cantidad se disminuye el Vf. De esta manera, a medida que los usuarios consuman menos agua, el IANC aumenta, sin que esto signifique que la empresa operadora esté descuidando o no esté haciendo gestión al menos para mantenerlo en un nivel dado. El efecto contrario ocurre cuando en su sistema de distribución o un sector, existe un gran consumidor, como por ejemplo una planta embotelladora de bebidas. El volumen total distribuido se aumenta significativamente, y se aumenta también en esa misma cantidad el Vf, manteniendo constante la diferencia entre el Vd y el Vf, pero el IANC baja. Es decir, el hecho de que en un sector se establezca un gran consumidor de agua, hace que el IANC se disminuya, sin que el operador haya realizado actividades para disminuir en forma real sus pérdidas técnicas y comerciales. Por todos estos aspectos, no es válido comparar un IANC en la forma porcentual definida, de una ciudad con otra, y ni siquiera es válido compararlo con dos sectores de una

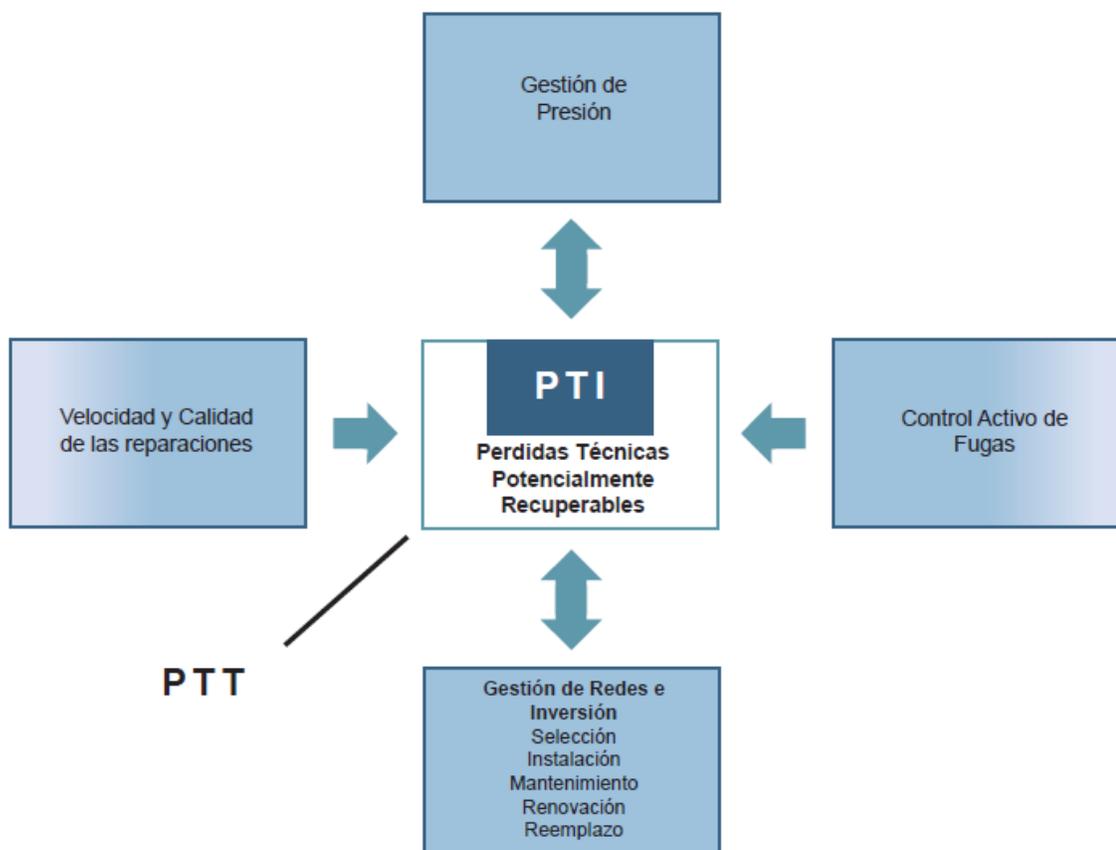
misma ciudad, porque depende de qué ciudad consuma más o menos agua por suscriptor, o depende de qué grandes consumidores existen en una u otra ciudad, o en uno u otro sector. Tampoco sirve para evaluar la gestión a lo largo de un período dentro de un mismo sector, porque el nivel de consumo de los usuarios varía con el tiempo (En realidad disminuye cada vez más) y también es afectado por la implantación, o el retiro de los grandes consumidores. Por todos los anteriores aspectos, el IANC en la forma porcentual antes definida, realmente no es adecuado para el propósito por el cual fue concebido, y los operadores concededores de la deficiencia y debilidad de este indicador, lo pueden manejar y manipular a su antojo, para obtener los resultados que deseen. Existen varios indicadores de pérdidas de agua, unos mejores que otros y algunos no apropiados para algunos objetivos específicos. Por ejemplo, cuando se realiza el monitoreo de caudales en horario nocturno para identificar la presencia de fugas, la medición se toma generalmente en litros/segundo- L/s (o m³/s según el caso). Si el objetivo es la selección de sectores para la localización de fugas, el caudal nocturno generalmente se convierte a una de las siguientes medidas y se comparan: i), % del caudal medio diario; ii), Litros/km de red/ hora; iii), Litros/vivienda/hora o iv), Litros/conexión de servicio/hora (Farley y Trow, 2003). En general, se reconoce la existencia de dos tipos de indicadores de pérdidas de agua: los indicadores financieros y los indicadores operacionales. Los primeros 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. 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 (CRA, 2013).

La cantidad de agua que se pierde en un sistema de acueducto y sus indicadores son de vital importancia en la evolución positiva o negativa de la eficiencia en la prestación de servicio. Sin embargo una red libre de fugas es impensable tanto técnica como económicamente, debido a que aun en sistemas bien operados y con un magnifico mantenimiento, no se pueden evitar niveles mínimos de pérdidas de agua. El Índice de infraestructura de Fugas (The Infrastructure Leakage Index), ILI por sus siglas en inglés incorpora este concepto y se expresa como la relación entre las pérdidas técnicas totales (PTT) y las pérdidas técnicas inevitables (PTI).

Los resultados del cálculo del ILI oscilan entre 1 y valores superiores a 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 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”. La Figura 3 muestra el concepto del ILI; de manera esquemática se considera a las PTT como un rectángulo. A medida que transcurre la vida útil de la red y se presentan más fugas entre otros aspectos, las PTT aumentan gradualmente a menos que los cuatro métodos básicos de la gestión de estas pérdidas técnicas (representados por las cuatro flechas) se apliquen de manera efectiva.

Figura 3. Representación Gráfica del Concepto ILI.



Fuente: Lambert y McKenzie, (2002)

A pesar de la aparente simplicidad de la fórmula del ILI, la estimación de las variables PTT y PTI, requiere de un conocimiento avanzado del sistema de acueducto por parte del prestador del servicio, pues para la estimación del valor de PTT se recomienda utilizar la Matriz de Balance de Agua propuesta por el IWA; además, para la estimación del PTI 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

considerar todas las particularidades que presenta un sistema de acueducto (CRA, 2013).

Pero, ¿es el ILI un indicador ampliamente usado y lo suficientemente conocido?, la respuesta es no. Debido a la complejidad que puede generar el uso y cálculo del ILI, sumado a que muchas de las empresas prestadoras del servicio siguen siendo reacios a cambiar el tradicional IANC, se ha propuesto una metodología simplificada para hacer más sencillo su uso como indicador que permita facilitar a los prestadores su gestión en la reducción de pérdidas (Liemberger y McKenzie, 2005; Kingdom et al., 2006). Esta metodología, de acuerdo con la CRA, (2013) en el contexto nacional es definida como Matriz Sistema de Bandas para Gestión de Pérdidas Técnicas, mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. **Matriz Sistema de Bandas para Gestión de Pérdidas Técnicas – Uso simplificado ILI**

Categoría Desempeño Técnico		ILI	Pérdidas técnicas (Litros/conexión de servicio/día)				
			Presión Promedio (m.c.a)				
			10	20	30	40	50
Países desarrollados	A	1-2		<50	<75	<100	<125
	B	2-4		50-100	75-150	100-200	125-250
	C	4-8		100-200	150-300	200-400	250-500
	D	>8		>200	>300	>400	>500
Países en desarrollo	A	1-4	<50	<100	<150	<200	<250
	B	4-8	50-100	100-200	150-300	200-400	250-500
	C	8-16	100-200	200-400	300-600	400-800	500-1000
	D	>16	>200	>400	>600	>800	>1000

Fuente: Kingdom et al. (2006)

De acuerdo con la CRA (2013), esta metodología, denominada sistema de bandas, “*corresponde a la aproximación más simple que permite establecer unas metas de reducción de pérdidas técnicas de agua, considerando el número de conexiones del servicio, la presión promedio y el desempeño técnico de los prestadores*”. Las bandas establecidas, (Bandas de A hasta D), tienen el siguiente significado:

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.

En el ámbito de la gestión del recurso hídrico, además del concepto de pérdidas inevitables involucrados en el ILI, diversos autores han aplicado el concepto de resiliencia, describiéndolo como la rapidez con que un sistema de suministro de agua se recupera de una falla una vez ésta se ha producido; básicamente, “es una medida de la capacidad intrínseca que tiene una red de distribución para superar fallas repentinas” (Todini, 2000). Esta capacidad de resiliencia es posible cuantificarla mediante un nuevo parámetro denominado Índice de Resiliencia el cual determina el grado de uniformidad de presiones en una red de distribución o en un sector determinado de ella; bajo esta concepción, se ha establecido que entre mayor sea el grado de uniformidad de presiones en un sector, menores son las pérdidas técnicas. En estudios realizados por la Universidad de los Andes de Bogotá se ha desarrollado una metodología para determinar qué tipo de tuberías deben reemplazarse en un sector dado para lograr una mayor uniformidad de presiones, sin embargo, su aplicación requiere conocer los coeficientes y exponentes emisores que caracterizan a la red y por lo tanto, también se hace conveniente desarrollar métodos de campo que logren determinar dichos exponentes bajo condiciones específicas, como se discutirá más adelante.

Resiliencia: *“es una medida de la capacidad intrínseca que tiene una red de distribución para superar fallas repentinas”* (Todini, 2000).

4. Aspectos generales de la modelación y diseño bajo ambiente de fugas o pérdidas técnicas

Un buen sistema operativo de las redes de distribución, y su proceso constructivo previo, nacen de un buen diseño y de su conceptualización respectiva. Diseñar bajo ambiente de fugas y conceptualizar parámetros y criterios que sean medibles tanto en el proceso de construcción como en su operación misma, y que realmente definan la correlación e interdependencia entre estas diferentes etapas, requiere de algunos principios básicos, simples y sencillos dentro de la hidráulica misma. La ecuación general que define las pérdidas técnicas en un sistema de distribución de agua potable está dada por la siguiente expresión:

$$Q_F = K P^X$$

donde:

Q_F: Caudal de pérdidas técnicas, (L/s)

K: Coeficiente Emisor o de descarga
(adimensional)

P: Presión (m.c.a)

X: Exponente Emisor (adimensional)

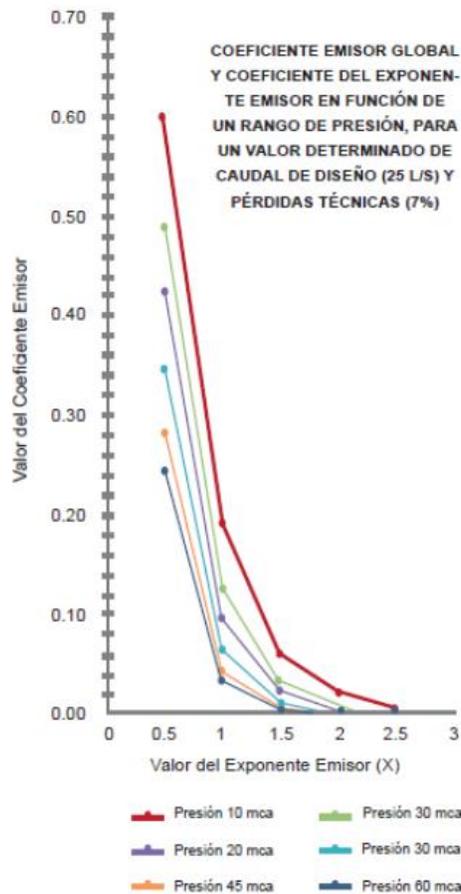
La dificultad en utilizar esta formulación en una modelación bajo ambiente de fugas, no radica en su ecuación misma que a todas luces es muy sencilla y que ya la tienen incorporada la mayoría de los software de modelación, sino en la falta de conocimiento de los parámetros K y X, que dada nuestra poca práctica investigativa, se desconocen por completo y que adicionalmente se ignora y desaprovecha la correlación que ellos ofrecen a través de los diferentes etapas de implementación de una red de distribución como son la del diseño, la de construcción y la de su operación. Y es aquí precisamente en el estudio de estos parámetros donde radica el tema principal de este artículo, ya que a través de su conocimiento y evaluación se podrán hacer las conceptualizaciones necesarias para aplicar en los temas de diseño, construcción y operación de un sistema de distribución de agua potable, y de esta manera lograr una integralidad en toda su implementación y eliminar esa práctica equivocada de otorgarle a las pérdidas técnicas un comportamiento igual al de la demanda, y donde los diseños van por un lado, la construcción por otro, y la operación poco sabe de cómo se diseñó y cómo ha sido construido. En la Tabla 3 y Figura 4 que se presenta a continuación, se han determinado un rango de valores de coeficientes emisores(K) y exponentes emisores (X), en función de un rango amplio de presiones de operación de la red, a manera de ejemplo para un caudal promedio de demanda neta de 25 L/s, que puede corresponder a la demanda neta de un solo sector (Sin incluir las pérdidas técnicas) y unas pérdidas técnicas máximas del 7%. Se ha tomado este valor del 7%, porque es lo que recomienda el nuevo RAS en proceso de actualización y aprobación, para la componente sistema de distribución de agua potable. Valores menores a este valor, podrán tomarse según criterio del diseñador.

Tabla 3. Coeficientes emisores (K) y Exponentes emisores (X)

RANGO DE VALORES DEL COEFICIENTE GLOBAL EMISOR PARA DIFERENTES VALORES DEL EXPONENTE EMISOR (X) Y PARA UN RANGO DE VALORES DE PRESIÓN PROMEDIO DE SERVICIO EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN							
NOTA: Esta Tabla No 3 se ha construido para los siguientes Parámetros de Diseño							
Caudal de diseño del Sector como demanda promedio total sin incluir las pérdidas Técnicas (L/s)		Pérdidas Técnicas Máximas Asumidas, Acordadas o Reglamentadas para el Diseño					
		Porcentaje (%)			Valor (L/s)		
25		7			1,88		
VALOR DEL EXPONENTE EMISOR	PRESIÓN PROMEDIO (m.c.a) EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN						
	5	10	15	20	30	45	60
(X)	VALOR DEL COEFICIENTE GLOBAL EMISOR PARA DIFERENTES VALORES DEL EXPONENTE EMISOR (X) Y PARA DIFERENTES VALORES DE PRESIÓN PROMEDIO DE SERVICIO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN						
0,5	0,841531	0,595052	0,485858	0,420765	0,343554	0,280510	0,242929
1,0	0,376344	0,188172	0,125448	0,094086	0,062724	0,041816	0,031362
1,5	0,168306	0,059505	0,032391	0,021038	0,011452	0,006234	0,004049
2,0	0,075269	0,018817	0,008363	0,004704	0,002091	0,000929	0,000523
2,5	0,033661	0,005951	0,002159	0,001052	0,000382	0,000139	0,000067

El rango de variación de los Exponentes Emisores, varían desde un mínimo de 0.5 hasta un máximo de 2.5 para casos excepcionales. La literatura especializada ha encontrado que el valor mínimo de 0.5 como exponente emisor corresponde a orificios perfectamente circulares, tales como los que pueden presentarse en una tubería metálica por efectos de la corrosión principalmente. En tuberías de plástico no se presentan orificios circulares, sino más bien alargados tales como los que resultan de una unión defectuosa o cuyo empaque se ha deteriorado con el tiempo. Para este tipo de tuberías un valor inicial de 1.5 puede tomarse como valor para el exponente emisor. De acuerdo con el ejemplo, un valor adecuado del coeficiente global emisor (K) para el diseño de esta red nueva en dicho sector que demanda 25 L/s, con un porcentaje máximo de pérdidas del 7%, suponiendo tubería plástica y asumiendo la realización de una administración de presiones a través de una válvula reguladora o un dispositivo equivalente, se puede adoptar $K=0.011452$, correspondiente a una presión de 30 m.c.a y un exponente emisor de 1.5.

Figura 4. Coeficientes Emisores (K) y Exponentes Emisores (X)



5. Determinación de los coeficientes y exponentes emisores (K, X) en campo, en una red recientemente construida o en una red existente antigua

En el ítem anterior se realizó un análisis de los posibles valores de los coeficientes y exponentes emisores (K, X) para utilizar en un diseño dado, se observó gráficamente cómo es el comportamiento y la correlación existente entre ellos, y se logró definir un rango donde pueden encontrarse estos valores y que con un buen criterio del diseñador y del ente que revisa y aprueba, se facilita la adopción de alguno de ellos. No obstante, esta situación no deja de molestar al investigador y diseñador más estricto, que podría objetar por qué no se toma otro valor diferente, principalmente el correspondiente al exponente emisor (X), objeción que es muy válida.

La respuesta a este aspecto específico está en que se debe fomentar la investigación de campo (que realmente es nula en nuestro medio frente a esta situación), para determinar con exactitud estos parámetros tanto en redes nuevas como en redes antiguas y de esta manera ir complementando nuestra biblioteca

de ingeniería con valores reales tomados de redes existentes en operación asociados a condiciones específicas de material, edad, tipo de suelos y otros aspectos específicos propios

de cada sector en cada red en cada pueblo o ciudad.

Para obtener estos valores en campo, se debe tener una red sectorizada (O bien un solo sector) donde se pueda determinar con precisión el caudal de entrada en cada sector (A través de un macromedidor electro magnético preferiblemente), y una válvula reguladora de presiones también a la entrada del sector, que permita generar como mínimo tres valores de presión diferentes. La metodología consiste en generar tres diferentes valores de caudal de fugas, para tres diferentes valores de presión (En realidad y desde el punto de vista teórico solo se requerirían dos valores de presión y dos de fugas) y resolver el sistema de ecuaciones simultáneas teniendo ahora como incógnitas los parámetros K y X. Bajo el ensayo de campo que se propone, no deber haber ningún tipo de consumo por parte de los usuarios, de tal manera que lo que registre el macromedidor, realmente corresponda al caudal de fugas. Esto puede representar una dificultad operacional, si bien los sectores que se implementan en la actualidad, son relativamente pequeños.

Para una red nueva no hay ninguna dificultad, porque la prueba se debe realizar antes de que los usuarios se conecten Para una red antigua, esta prueba de campo puede realizarse en la noche en un período de 6 a 9 horas, donde a todos los usuarios se les ha “cortado” el servicio, cerrando la llave de control que existe para este caso. Con los valores obtenidos de caudales (Q1 y Q2) asociados a los valores de presión, P1 y P2, se calcula la magnitud de los exponentes K y X mediante las siguientes expresiones:

$$\mathbf{X = \ln (Q1/Q2) / \ln (P1/P2)}$$

$$\mathbf{K = Q1 / P1^{(\ln (Q1/Q2)/\ln(P1/P2))}}$$

Si en lugar de dos pares de valores de Q y P, se obtienen 3, como es lo recomendado, un método gráfico, determina fácilmente los valores de K y X, realizando el ajuste por algún sistema de regresión, o por cualquier otro método equivalente. Encontrados estos valores en una red nueva, y si se asume que ha

sido construida en forma correcta casi completamente estanca a valores de presión máximos, los valores encontrados de K y X deben estar dentro de la especificación dada en el diseño inicial.

Es decir, se propone que el constructor al momento de entregar la red nueva recientemente construida, realice el ensayo de campo propuesto y determine los valores de K y X, los cuales deben generar un valor de pérdidas técnicas muy inferior al propuesto en el diseño, ya que los valores allí supuestos se asumen que son para las condiciones promedio de operación cuando la red ya haya adquirido alguna edad de operación.

La sorpresa sería que la red recientemente construida presente ya pérdidas técnicas superiores a las supuestas en el diseño, lo cual por supuesto es inaceptable. Recuérdese que este ensayo debe hacerse con las domiciliarias instaladas, pero sin consumo de parte de los usuarios (el registro de corte debe estar cerrado), porque la práctica ha demostrado que es allí precisamente donde se origina el mayor volumen de estas pérdidas.

Normalmente las redes matrices y secundarias se prueban sin las domiciliarias puestas, según las diferentes normatividades, y posteriormente se instalan las domiciliarias, y aquí es donde se genera el peligro potencial de dejar desde un comienzo un volumen de pérdidas técnicas, lo cual como ya se indicó, es inaceptable para una red recién construida.

En realidad, una red bien construida, con especial énfasis en la selección de los materiales adecuados para las acometidas domiciliarias y aplicando adecuadamente los métodos de construcción, debe resultar en un coeficiente emisor cercano a cero, para la presión máxima de servicio estipulada en el diseño.

6. Valores de K y X como control operacional de una red de distribución

Los valores de K y X, son contantes para una determinado momento, y representan valores promedio para el sector, pero con el tiempo sí varían ya que la red se va deteriorando y principalmente el valor de K puede ir en aumento. Es en este aspecto que radica la necesidad e importancia de medir periódicamente estos parámetros, para determinar cómo es su evolución a través del tiempo, y tomar las medidas correctivas del caso, ya sea en disminución de fugas no visibles y/o reposición de tramos de tuberías obsoletas y que ya han cumplido su vida útil, o en la implementación de programas mejor orientados hacia el área comercial. El realizar el seguimiento periódico, a los valores de K y X, por ejemplo una vez al año por sector, permite tener el control operacional total del

sistema, y a partir del análisis y evaluación de su comportamiento, implementar las medidas y programas correctivos necesarios.

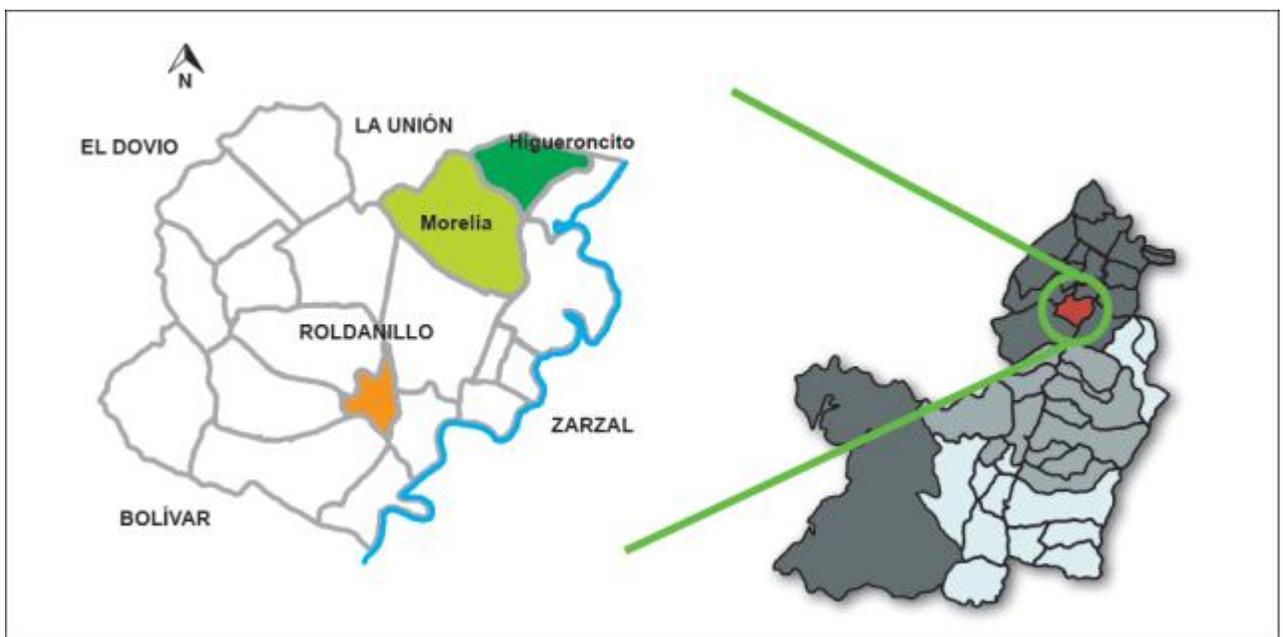


7. Desagregación real entre las pérdidas técnicas y comerciales en una empresa de servicios públicos de acueducto y definición de mejores programas en torno a la disminución del volumen de agua no contabilizada

En una empresa de servicios públicos la desagregación entre las pérdidas técnicas y las comerciales, es una tarea que la mayoría de las veces no se resuelve adecuadamente, y en el mejor de los casos, cuando se tiene un buen balance tipo IWA, aún prevalecen los supuestos, y dependiendo del mayor poder de decisión o rango en la empresa entre el director comercial y el técnico, la balanza se inclinará hacia uno u otro lado. No obstante, si se conocen con exactitud los valores de K y X , y se conoce el comportamiento de presiones en el interior de dicha red, se puede determinar con exactitud el volumen de pérdidas técnicas reales a lo largo de un período dado, por ejemplo, un día o un mes, y de esta manera, por diferencia con el volumen total de agua no contabilizada, se puede entonces obtener las pérdidas comerciales reales. Lo que actualmente se hace es todo lo contrario, o sea, de alguna manera bien o mal, se estiman las pérdidas comerciales, y por diferencia con el volumen total de agua no contabilizada se determinan las pérdidas técnicas, sin que los del área técnica tengan derecho a revisar u objetar esta estimación.

Es clara la importancia de conocer realmente y en forma precisa el desagregado entre pérdidas técnicas y comerciales ya que ello permite, asignar recursos, aplicar metodologías, llevar a cabo estudios de viabilidad técnica, comercial y financiera y retorno de la inversión, en un programa técnico y financieramente bien balanceado en busca de los mejores resultados para la empresa operadora. La sectorización y la administración de presiones está de moda, y las empresas invierten grandes sumas de dinero en estos proyectos, pero la mayoría de las veces lo hacen sin estimar siquiera cuales van a ser los resultados esperados, y lo que es peor, sin conocer cuál es el grado de retorno de la inversión, si es que la hay, por no conocer bien cuál es el estado real de una red en términos de sus parámetros K y X, y qué tanto se pueden disminuir las pérdidas técnicas con solo la administración de presiones, o a partir de qué momento debe entrarse mejor a realizar una reposición de redes antiguas.

8. Proyecto de abastecimiento de agua potable para los corregimientos de Morelia (Higuerón) e Higueroncito en el municipio de Roldanillo



El Municipio de Roldanillo se encuentra ubicado al Norte del Valle a 135 km de la ciudad de Cali, tiene una extensión superficial de 217 km² y está constituido por 19 corregimientos y 16 veredas en la zona rural. Los corregimientos de Morelia- Higuerón e Higueroncito hacen parte de la región plana del municipio, comprendida entre la orilla del Río Cauca y las estribaciones de la Cordillera Occidental¹⁵. El proyecto de abastecimiento de agua potable para los corregimientos de Morelia- Higuerón e Higueroncito nace de la necesidad de

proveer agua apta para consumo humano a sus habitantes, los cuales se abastecen principalmente a través de sistemas individuales (aljibes) sin ningún tipo de tratamiento, (ver Diagnostico).

	
DIAGNÓSTICO SERVICIO DE ACUEDUCTO	
<p style="text-align: center;">Corregimiento de Morella - Higuérón</p>	<p>Los indicadores de calidad, continuidad y presión del sistema de acueducto, se encuentran por debajo de los estándares legales. Se abastece de un pozo profundo con una antigüedad aproximada de 20 años, de donde se bombea el agua sin ningún tipo de tratamiento hacia un tanque elevado para el posterior suministro a la red de distribución. La distribución se hace por periodos de unas pocas horas, cada tres días, con una cobertura del 20% de la población (alrededor de 75 Viviendas) y presenta limitaciones en su infraestructura. La caracterización fisicoquímica del agua denota valores altos en la concentración de dureza y de hierro total, los cuales superan los valores establecidos en la normatividad colombiana en cuanto a calidad de agua para consumo humano. El sistema es administrado por una junta de acueducto local y no existe micromedición.</p> <p>La fracción restante de población se abastece a través de aljibes individuales que suministran agua con una calidad fisicoquímica similar al del sistema colectivo. Esta situación ha originado que la mayoría de los usuarios se vean obligados a obtener el agua potable desde el casco urbano de Roldanillo o desde La Unión a costos superiores a los que normalmente se pagaría a través de un sistema de acueducto.</p>

<p style="text-align: center;">Corregimiento de Higueroncito</p>	<p>Los indicadores de calidad, continuidad y presión del sistema de acueducto, se encuentran por debajo de los estándares legales. El sistema se abastece de una fuente superficial; el agua se conduce por gravedad y es distribuida sin ningún tratamiento mediante mangueras de polietileno a aproximadamente 20 viviendas, equivalentes a alrededor del 7% del total de viviendas existentes en el corregimiento.</p> <p>La fracción restante de población se abastece de aljibes individuales cuya calidad fisicoquímica de agua denota valores altos en la concentración de dureza y de hierro total, los cuales superan los valores establecidos en la normatividad colombiana en cuanto a la calidad de agua para consumo humano. La mayoría de la población compra agua potable a proveedores particulares.</p>
---	--

Las obras en ejecución, comprenden el suministro de agua desde la PTAP La Unión, esta última se surte del Sistema de Abastecimiento Regional de Agua “SARA-BRUT”, principal reservorio de agua para consumo humano de la región. La cota de los tanques de almacenamiento de la PTAP de La Unión, permite abastecer a gravedad a los corregimientos de Morelia e Higueroncito. Adicionalmente, no se requirió la construcción de nuevas estructuras en la PTAP, ya que el sistema actual tiene capacidad para suministrar la demanda de agua de la población en los dos corregimientos, el caudal máximo Horario es de 14.7 L/s.

Las obras inician en un punto de intercepción con el Canal ASORUT, ubicado a una distancia de 1 km desde la glorieta del Municipio de la Unión sobre la vía que conduce hacia La Victoria. En este punto se realizará el empalme del extremo de la línea de conducción en PVC Ø8” del proyecto con la línea de red matriz del acueducto proveniente de la Planta de Tratamiento de La Unión. Posteriormente, se ubica una estación de macromedición y cierre automático, cuya función es servir como mecanismo para controlar el flujo de agua en caso de una fractura en la línea de conducción, en cuyo caso la estación de control deberá cortar el flujo automáticamente para evitar el desperdicio de agua. En esta estación se supervisará la presión y caudal de agua en la sección de la conducción. Entre sus componentes, se cuentan equipos y accesorios de última tecnología, que incluyen macromedidor, válvula anticipadora de onda, válvula anti-rotura, ventosas entre otros. Luego de la estación de control, la conducción del agua potable continúa paralela al canal de riego ASORUT hacia Higueroncito y Morelia- Higuerrón. Al llegar a Higueroncito el agua se conduce hacia una estación de control sectorial y de allí hacia la red de distribución. En Higueroncito se dispone de dos sectores a la salida de la Caja Estación de Control, parte alta y parte baja.

La estación de control sectorial en Higueroncito, tiene como función el de administrar y supervisar las presiones de entrada a la red. En este punto se esperan presiones de 90 m.c.a. (128 psi) y se esperan reducir a 35 m.c.a. (50 psi). También es parte de sus funciones, controlar y distribuir el caudal hacia los dos sectores en los cuales esta dividida la red, punto clave para el cálculo de índices de pérdida de agua. Entre sus componentes, se cuentan equipos y accesorios de última tecnología, que incluyen macromedidor, válvula reductora de presión piloteada y ventosas entre otros.

Al llegar a Morelia- Higuerrón, el agua es conducida hacia una caja de control de nivel que permitirá controlar el nivel en dos tanques de almacenamiento posteriores (uno de los cuales corresponde a un tanque existente, el cual se requiere acondicionar para que trabaje en serie o en paralelo con el tanque nuevo

construido); en un punto intermedio entre la caja de control de nivel y las unidades de almacenamiento, se ubica la caseta de cloración la cual permitirá garantizar la concentración de cloro residual y una calidad de agua óptima para el usuario final.

Posterior al almacenamiento, el agua se conduce hacia una estación de control sectorial y de allí hacia la red de distribución. En Morelia se disponen de tres sectores a la salida de la Caja Estación de Control Sectorial, parte alta, parte intermedia y parte baja.

La estación de control sectorial en Morelia- Higuierón, tiene como función el de administrar y supervisar las presiones de entrada a la red. En este punto se esperan presiones de 52 m.c.a. (75 psi) y se esperan reducir a 40, 20 y 15 m.c.a. (57, 29 y 21 psi) en la entrada a los tres sectores. También es parte de sus funciones, controlar y distribuir el caudal hacia los tres (3) sectores en los cuales está dividida la red, punto clave para el cálculo índices de pérdidas de agua. Su equipamiento es similar al de la estación de control sectorial de Higuieroncito.

Los componentes del sistema de acueducto, contarán con un tecnología que a través de un medio de transmisión, permitirá obtener de forma remota la información registrada en los macromedidores y manómetros sin tener un contacto directo con los equipos de medición; adicionalmente, ésta tecnología permitirá el almacenamiento de datos haciendo más eficiente el proceso de recolección y el análisis de información. Las obras en ejecución en los corregimientos de Higuieroncito y Morelia-Higuierón satisfacen la garantía de calidad pues se seleccionaron materiales y equipos de la más alta calidad que traerá como beneficios el incremento de la vida útil de los sistemas, la reducción de inversión en el mantenimiento, renovación y reemplazo y una mayor eficiencia en la proyección y ejecución de actividades relacionadas con la gestión de pérdidas de agua.

9. Conclusiones

- Se definen los criterios y principios básicos para llevar a cabo la modelación de redes de distribución de agua potable, bajo ambiente de fugas, conociendo y aplicando los coeficientes y exponentes emisores K y X, y abandonando el sistema tradicional que implícitamente contiene un gran error al suponer que las fugas o pérdidas técnicas se comportan igual que la demanda de los usuarios.
- Se propone una metodología de campo, con carácter de investigación, que permite determinar los valores de los coeficientes y exponentes emisores, y caracterizar en mejor forma la gran variedad de redes que operan en nuestro

medio, incluyendo tuberías tan antiguas como asbesto cemento, hierro fundido, hierro galvanizado, las nuevas en PVC y las más modernas como el polietileno de Alta Densidad y la tubería de fibra de vidrio.

- Se propone una metodología innovadora, basada en principios hidráulicos simples, que permite correlacionar las diferentes etapas de la implementación de un sistema de distribución de agua potable, correspondientes a su diseño, construcción y operación, a través del conocimiento y evaluación del comportamiento de los coeficientes y exponentes emisores denominados K y X.
- La separación y diferenciación entre pérdidas técnicas y comerciales se determina con precisión si se conocen los valores reales de los coeficientes y exponentes emisores K y X, eliminando los supuestos que generan las discusiones entre las áreas técnicas y comerciales, y permitiendo realmente proyectar programas de sectorización y administración de presiones bajo criterios que determinen los beneficios reales que se obtendrán y si las inversiones realizadas pueden recuperarse en un determinado período. Adicionalmente podrá determinarse con mayor precisión el momento en que debe iniciarse la reposición de redes obsoletas bajo esquemas que incluyan siempre viabilidades no solamente técnicas sino principalmente financieras.
- La gestión y el control de una red de distribución que se opera bajo un esquema sectorizado y de administración de presiones, puede llevarse en mejor forma si se conoce la evolución y el comportamiento del coeficiente y exponente emisor. Estos valores de K y X, podrán relacionarse con otros indicadores como el Índice de infraestructura de Fugas (The Infrastructure Leakage Index), ILI por sus siglas en inglés y el Índice de Resiliencia y encontrar relaciones válidas comparativas, actividades pertinentes de acuerdo con lo proyectado en el RAS 2000 en proceso de actualización y aprobación.