

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



Proyecto de Grado
Pregrado en Ingeniería Civil

**Efecto del agua perdida por fugas detectables y no
detectables sobre la decisión de compra de tuberías
con criterio único de costo mínimo**

Por:
JUAN DIEGO CÉSPEDES HENAO
Cód. 200410461

Bogotá D.C., Diciembre de 2008

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



Proyecto de Grado
Pregrado en Ingeniería Civil

Efecto del agua perdida por fugas detectables y no detectables sobre la decisión de compra de tuberías con criterio único de costo mínimo

Por:
JUAN DIEGO CÉSPEDES HENAO
Cód. 200410461

Asesor:
ING. JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

Bogotá D.C., Diciembre de 2008

***A Luisgui, Nelly, Pipe y Ana
Quienes siempre me han acompañado***

AGRADECIMIENTOS

Dado que el presente es el trabajo que presento como proyecto de grado de Ingeniería Civil, me voy a tomar el atrevimiento de dar estos agradecimientos no solo a aquellas personas que hicieron posible la realización del trabajo aquí presentado sino también a todos aquellos que de una u otra manera colaboraron para que en este momento llegue al final de mi pregrado como Ingeniero Civil.

Primero, quiero agradecer a Dios, quien en todo momento nos acompaña y apoya y que en los momentos de duda nos da capacidad para seguir adelante y no bajar los brazos.

Quiero dar un agradecimiento muy especial al ingeniero Juan Saldarriaga, profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, que con su labor como asesor hizo posible el resultado final de este texto, le agradezco por permitirme el placer trabajar con él. Agradezco también al ingeniero Mario Moreno, profesor instructor del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, quien jugó un papel fundamental en el desarrollo del presente brindando ayuda y acompañamiento constante, resolviendo y dando recomendaciones sobre cualquier duda presentada en el camino.

También agradezco a los Ingenieros Investigadores del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) quienes siempre estuvieron a disposición para cualquier colaboración necesaria en este proyecto. A la ingeniera Susana Ochoa, estudiante de maestría en la Universidad de los Andes, quien brindó un gran apoyo en la consecución bibliográfica. A las personas de las empresas PAVCO y PAMCOL quienes sin dudarle proporcionaron toda la información solicitada.

Agradezco a la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL que por medio de su programa bachilleres por Colombia pago por mis estudios y me permitió llegar a la realización de este trabajo. A todos los profesores y compañeros que infundieron algo en mi mente para que a la postre pudiese escribir el presente.

Agradezco mucho a mis padres y hermanos, a quienes dedico el presente, ya que permitieron tantas cosas en mi vida y entre ellas esto, no alcanzan las palabras para agradecerles por todo el apoyo brindado.

Finalmente, agradezco a todo aquel que lea estas palabras, de esta manera todo el esfuerzo realizado no se tirará por la borda.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN, INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1	Resumen	3
1.2	Introducción	4
1.3	Objetivos	6
1.3.1	General	6
1.3.2	Específicos	6
2	ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	7
2.1	Diseño con Algoritmos Genéticos	7
2.2	El índice de agua no contabilizada IANC	8
2.2.1	Pérdidas Técnicas	9
2.2.2	Pérdidas Comerciales	10
2.3	Modelación de Fugas	11
2.3.1	El agua fugada como porcentaje del total del agua consumida	11
2.3.2	La utilización de demandas fijas	11
2.3.3	La utilización de emisores	11
2.3.4	Lo que viene	12
2.4	Costo del agua en Colombia	13
3	DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR	15
3.1	Redes seleccionadas para modelación y justificación	15
3.1.1	R 28:	15
3.1.2	Andalucía Alta (CIACUA, 2006)	16
3.1.3	Sector 35 (CIACUA, 2002)	17
3.1.4	Candelaria (CIACUA, 2006)	18
3.1.5	La Cumbre (CIACUA, 2006)	19
3.2	Metodología para la modelación hidráulica	20
3.2.1	Consumos en la red en el tiempo	20
3.2.2	Modelación de fugas	21
3.2.3	Funciones de costo utilizadas	23
3.3	Metodología para análisis económico	24
3.3.1	Descripción y justificación de parámetros	24
3.3.2	Factores ha hallar y analizar	26
4	DESARROLLO Y RESULTADOS DE MODELOS HIDRÁULICOS	27

4.1	PARA PVC	27
4.1.1	R28	27
4.1.2	Andalucía Alta	42
4.1.3	Sector 35 Bogotá	44
4.1.4	Candelaria.....	46
4.1.5	La Cumbre	48
4.2	Para Hierro Dúctil	50
4.2.1	R28	50
4.2.2	Andalucía Alta	52
4.2.3	Sector 35 Bogotá	54
4.2.4	Candelaria.....	56
4.2.5	La Cumbre	58
5	DESARROLLO Y RESULTADOS DE ANÁLISIS ECONÓMICO	60
5.1	En PVC	60
5.1.1	R28	60
5.1.2	Andalucía Alta	66
5.1.3	Sector 35 Bogotá	67
5.1.4	Candelaria.....	69
5.1.5	La Cumbre	70
5.2	Para Hierro Dúctil	71
5.2.1	R28	71
5.2.2	Andalucía alta	72
5.2.3	Sector 35 Bogotá	73
5.2.4	Candelaria.....	74
5.2.5	La Cumbre	75
6	ANÁLISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
6.1	Acerca del IANC.....	76
6.1.1	Comportamiento del IANC variable en el tiempo	76
6.2	Acerca de la modelación de fugas	78
6.3	De la influencia del agua fugada en el costo de la red	79
6.3.1	Para PVC.....	80
6.3.2	Para Hierro Dúctil.....	81
7	BIBLIOGRAFÍA.....	85
8	LISTAS	88
9	ANEXOS	91

1 RESUMEN, INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Resumen

El presente informe que se presenta a manera de proyecto de grado de Ingeniería Civil, realiza un análisis de la influencia del agua pérdida por fugas detectables y no detectables sobre la decisión de compra de tuberías con criterio único de costo mínimo.

Primero realiza una recopilación bibliográfica de los conceptos más importantes para el trabajo (*ver sección 2*) como lo son el diseño de redes de distribución de agua potable por medio de algoritmos genéticos, el índice de agua no contabilizada, la modelación de fugas y los costos del agua en Colombia.

Luego se realiza una modelación de diseño hidráulico (*ver sección 4*) incluyendo diferentes suposiciones de fugas para cinco redes (cuatro con topologías reales y demandas reales y una completamente hipotética), para dos materiales de tuberías diferentes (Policloruro de Vinilo PVC y Hierro Dúctil) en cada una de las redes. La demanda en las redes es variable en el tiempo acorde con proyecciones de demanda y de población (*ver sección 3.2.1*). Las modelaciones de fugas incluyen dos hipótesis diferentes, la primera, que el índice de agua no contabilizada (IANC) se mantiene constante en el tiempo; y la segunda, que el IANC varía en el tiempo (*ver sección 3.2.2.1*).

Después, se realiza un análisis económico de VPN (*ver sección 5*) para cada una de las redes que permita comparar el costo del agua fugada (en valor presente) con el costo hipotético de las tuberías el cual es dado a partir de funciones de costo deducidas de cotizaciones de los comercializadores de los materiales (*ver sección 3.2.3*).

Finalmente se realizan conclusiones y recomendaciones acerca de lo observado (*ver sección 6*), no solo en términos del objetivo principal (el efecto del agua pérdida por fugas detectables y no detectables sobre la decisión de compra de tuberías con criterio único de costo mínimo), donde se observa que realmente si debe existir una influencia representativa; sino también en términos de otros aspectos encontrados en el desarrollo del trabajo tales como, el comportamiento del IANC y la modelación de fugas.

1.2 Introducción

Desde hace miles de años la raza humana ha utilizado sistemas de abastecimiento de agua potable para facilitar su existencia. Estos sistemas antiguamente fueron diseñados y construidos con base en la experiencia empírica de la persona (fuese un ingeniero hidráulico o no) encargada de dicha labor. Solo hasta el siglo XIX se desarrollaron ecuaciones para el diseño de sistemas de redes de abastecimiento de agua potable de tal suerte que con el paso de los años se ha evolucionado en el diseño de dichos sistemas.

Al igual que el diseño, la construcción de las redes de distribución de agua potable o acueductos, han dependido y evolucionado a la par de los materiales y la tecnología disponibles en determinado lugar y momento en el tiempo. Pero hoy en día con la apertura de fronteras económicas y la globalización, el lugar ya no es una limitante para tener acceso a determinada tecnología y/o material, razón por la cual en cualquier parte del mundo, incluyendo Colombia, es posible trabajar cualquier material, teniendo como única limitante el valor económico del mismo.

Con el creciente desarrollo de las tecnologías de diseño y construcción de acueductos, en los años recientes se ha prestado especial atención a un problema que antes no se había teniendo en cuenta en un principio; este es el problema de las fugas o pérdidas de agua en los acueductos.

Las fugas acarrearán diversos costos tanto para los usuarios como para las compañías operadoras y el medio ambiente. Es por esto que las personas encargadas tanto del diseño como de la construcción y la operación han comenzado a prestar especial atención a la inclusión de las fugas en sus procesos, esto con el fin de disminuirlas al máximo o al menos cuantificarlas y tenerlas en cuenta al momento de dimensionar las redes de distribución. Es tal la preocupación por las fugas en sistemas de acueducto que países como el Reino Unido tienen programas obligatorios de reducción de fugas y tienen objetivos claros en este aspecto (Engelhardt, Skipworth, Savic, Saul, & Walters, 2000).

En Colombia, un tanto más tarde que en el resto del mundo, se está comenzando a tener una preocupación por el problema de las fugas, tanto detectables como no detectables, en el diseño, construcción y operación de los sistemas. Tanto es así, que incluso a nivel legislativo (ley 142 de 1994) el estado colombiano ha emprendido esfuerzos para la cuantificación y disminución de fugas en los acueductos del país.

El presente documento se centra en la perspectiva del problema por parte de las compañías que planean, construyen y operan los sistemas de distribución de agua potable o las "empresas de acueducto", como se les conoce en términos coloquiales en nuestro país.

Se pretende comparar el costo que tiene el sistema en términos de construcción y pérdidas de agua teniendo en cuenta fugas técnicas, con un sistema ideal en el cual las fugas no existan; con el fin de observar la influencia que tienen estas en la compra de un material, y hasta qué punto sería rentable o no conseguir otro tipo de materiales y/o sistemas constructivos en el mercado nacional o internacional (en el presente no se incluyen estos materiales) teniendo en cuenta como único criterio de decisión el de mínimo costo económico para la compañía.

El presente estudio incluye algunos elementos que lo destacan comparativamente con otros estudios similares tales como:

- Tiene en cuenta las fugas sobre la demanda futura al momento de realizar el diseño de la red y calcular su respectivo costo de construcción como se recomienda en las normativas de diseño (MinDesarrollo, 2000) y (EPM, 2007).
- Utiliza unas funciones de costo de tuberías a partir de catálogos actualizados de precios de compañías del sector en el país.
- Tiene en cuenta la variación de demanda año a año de la red para el cálculo del volumen total de agua perdida por fugas, es decir que modela la red ya diseñada año a año y no solamente plantea el consumo como constante durante el tiempo umbral de análisis
- Plantea dos condiciones de comportamiento de las fugas en el tiempo diferentes para observar su comportamiento (ver sección 3.2.2.1), que si bien no se plantean como fronteras de comportamiento, si cubren un espectro importante de la variación probable de estas.
- Utiliza en su modelación una red hipotética (a manera de ejemplo) y otras redes con topologías reales que permiten tener resultados más realistas que si solo se utilizaran redes hipotéticas o "inventadas". Además las demandas base utilizadas para las condiciones reales, corresponden a una calibración real de las redes realizada por el CIACUA.
- Se utiliza un programa computacional que permite obtener diseños que si bien no garantizan ser una solución óptima del problema, si son resultados muy confiables y reconocidos mundialmente por su alto grado de optimización de costos. (Saldarriaga, 2007)

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Observar el efecto que tiene el agua perdida por fugas detectables y no detectables sobre la decisión de compra de tuberías con criterio único de mínimo costo, mediante la comparación de la red como un sistema ideal (cero fugas) y como un sistema más real (incluyendo fugas).

1.3.2 Específicos

- Diseñar diferentes redes sin la inclusión de fugas.
- Diseñar diferentes redes incluyendo fugas que representen varios IANC (índice de agua no contabilizada) por pérdidas técnicas entre 10% y 40%.
- Simular el consumo de las redes año a año acorde con la metodología ilustrada en la sección 3.2.1.
- Hallar el volumen total de agua perdida en cada una de las redes planteando que el IANC por pérdidas técnicas no varía en el tiempo.
- Hallar el volumen total de agua perdida en cada una de las redes planteando que los parámetros involucrados en la modelación con emisores para fugas se mantienen constantes (sección 3.2.2.1.2)
- Realizar un análisis de VPN (valor presente neto) para las distintas redes sin la inclusión de fugas.
- Realizar un análisis de VPN para las distintas redes incluyendo las diferentes condiciones de fuga, tanto en el IANC como en su comportamiento en el tiempo.
- Realizar una comparación que permita plantear conclusiones acerca de cómo las diferentes condiciones de fuga influyen en el costo de la red y por ende en la decisión de compra de las tuberías.

2 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño con Algoritmos Genéticos

Para la modelación hidráulica de la red (diseños) se utiliza la metodología de algoritmos genéticos del programa computacional REDES (Saldarriaga, 2008) . Buscando minimizar el costo de la red acorde con las funciones de costo para cada material que se discutirán en la sección 3.2.3.

Los algoritmos genéticos son una metodología análoga a la teoría Darwiniana de la evolución de las especies. Se basan en la selección de una generación inicial de individuos (en el caso de diseño de redes de acueducto la generación inicial es una serie de combinaciones de diámetros para la red) y la posterior combinación (apareamiento) de algunas características de los individuos de acuerdo con una función de probabilidad (en la cual se prime a los elementos más fuertes) y una posibilidad de mutación al igual que en la naturaleza. (Lopez C. S., 2003)

Los algoritmos genéticos no garantizan la solución óptima de un problema dado que solo es un método de búsqueda ordenada en el espacio solución, el cual para redes de distribución de agua potable es de dimensiones excesivamente grandes, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$NR = (CD)^{NT}$$

Ecuación 2.1

donde NR es el número de combinaciones de redes posible, CD es el número de diámetros comerciales y NT es el número de tubos de la red; así pues que si se tiene una red común como la red Estadio de Bucaramanga que tiene 5324 tuberías y alrededor de 17 diámetros comerciales utilizables, el problema tendría $2.46 * 10^{5592}$ soluciones, razón por la cual es imposible con las herramientas computacionales actuales, analizar todas y cada una de las posibles soluciones. (Saldarriaga, Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos., 2007)

Entonces, los algoritmos genéticos representan una herramienta útil para solucionar el problema de diseño de una red de acueducto, más no brindan una solución óptima.

2.2 El índice de agua no contabilizada IANC

El agua no contabilizada (ANC) es toda aquella que aunque haya sido producida por la compañía prestadora de servicios, no es facturada (Lara Mesa, 2004). Numéricamente se cuantifica como la diferencia entre el agua producida (potabilizada) con el agua facturada.

$$ANC = AP - AF$$

Ecuación 2.2

El IANC, es el indicador más utilizado a nivel mundial para medir las pérdidas de agua que se dan al interior de un sistema de suministro de agua potable; es una de las principales fuentes de pérdida de recursos tanto hídricos como económicos para las empresas públicas de distribución de agua, dado que puede variar desde un 15%, en el mejor de los casos, hasta un 60% - 65% en los peores casos. (Todini, 2008)

De manera general, se define como la diferencia porcentual entre el total de agua producida y el total de agua facturada en un sistema de distribución de agua potable (acueducto) (Perez, 2004). Se calcula acorde con la siguiente ecuación:

$$IANC = \frac{AP - AF}{AP} * 100$$

Ecuación 2.3

donde:

ANC = Agua no contabilizada

IANC = Índice de agua no contabilizada

AP = Agua producida (potabilizada), medida en la fuente en la cual fue procesada.

AF = Agua Facturada, a partir del cobro realizado a los usuarios acorde con sus medidores individuales.

El agua perdida se debe a varias razones, entre estas se encuentran (Lara Mesa, 2004):

- ❖ El agua utilizada en la operación propia del agua de tratamiento.
- ❖ El agua perdida en la planta de tratamiento (transporte interno)
- ❖ Pérdidas por roturas y/o infiltración en el sistema de distribución (red de distribución que llega a los usuarios.
- ❖ Usos exentos del cobro del agua potable

- ❖ Usos no autorizados y/o no reportados del agua
- ❖ Ineficiencia de las compañías prestadoras del servicio
- ❖ Errores en la medición tanto de la producción como del consumo

En forma general, las diferentes formas de fuga, se clasifican comúnmente en dos, fugas comerciales y fugas técnicas. Las comerciales son aquellas causadas por el funcionamiento en sí de la empresa, es decir, son aquellas causadas por errores en la medición, conexiones no detectadas de usuarios a la red o por la no facturación del consumo de usuarios registrados; las técnicas, aquellas a tratar en el presente informe, son todas las fugas que se causan en los activos bajo tierra de la empresa, es decir, aquellas presentes en las estructuras de conducción (sistemas de tuberías).

Existen otras clasificaciones, menos comunes pero igualmente válidas; una de ellas es por el tipo de utilización que tiene el agua no contabilizada. Esta divide las fugas en pérdidas reales y pérdidas aparentes. Las reales son aquellas donde el agua producida no es consumida para el uso que tiene (abastecer a las personas) sino que se pierde aguas abajo del sitio de producción pero aguas arriba de los lugares de medición (consumidores) son similares a las pérdidas técnicas; las aparentes son aquella en donde el agua es realmente consumida mas no es facturada, es decir, "robos" de agua, son similares a las pérdidas comerciales.

2.2.1 Pérdidas Técnicas

Como se nombró anteriormente, estas son las pérdidas debido a problemas en los activos bajo tierra de las compañías. Su presencia más común se da en los accesorios que componen el sistema (uniones, tees, codos, yees, etc).

Estas pérdidas se subdividen a su vez en dos subcategorías, las fugas detectables (visibles, aparentes o reactivas) y las fugas no detectables (no visibles o proactivas). Las detectables son aquellas que por medio de métodos efectivos de monitoreo (ultrasonidos, cámaras, etc) son relativamente fáciles de detectar y por consiguiente reparar. Las no detectables son aquellas que para su detección requieren de métodos muy complejos y costosos y por ende, se decide no repararlas y simplemente asumirlas.

Acorde con estudios internacionales (Asian development Bank, 2001) muestran que la razón principal de la existencia de fugas técnicas es la pobreza en las especificaciones de los activos y equipos en los sistemas.

Adicionalmente otras causas de las fugas técnicas son:

- ❖ La degradación del material de la tubería debido a la composición del suelo que a rodea
- ❖ El rompimiento de las tuberías a causa de asentamientos diferenciales del suelo en el lugar de construcción
- ❖ Fallas en las uniones o en las tuberías a causa de sismos
- ❖ Roturas por transporte descuidado y la posterior instalación con mano de obra poco calificada
- ❖ Rompimiento por exceso de la presión admisible
- ❖ Rebores en los tanques de almacenamiento y la falta de hermeticidad en las estructuras.

En el presente informe, se trabajará exclusivamente con fugas técnicas tanto detectables como no detectables.

2.2.2 Pérdidas Comerciales

Como se nombró anteriormente estas pérdidas son causadas por problemas en la gestión en sí de la empresa prestadora del servicio. Sus principales causas son:

- ❖ La no detección de las conexiones ilegales a la red. Las conexiones de este tipo representan un volumen consumido de una magnitud alta, especialmente en municipios en donde el control no es muy estricto.
- ❖ Debido al mal funcionamiento de los medidores, se facturan valores menores a los realmente consumidos por los usuarios. En caso de suceder una desviación de los medidores en sentido contrario, es decir que marquen más de lo consumido, es común que los usuarios se quejen, razón por la cual este caso no es muy significativo.
- ❖ El cobro del agua a los usuarios por razones diferentes al consumo. Razones tales como: cobro según el área de ubicación, cobro por una tarifa única general, etc.
- ❖ El no cobro del agua a usuarios debido a la ausencia de los medidores ya sea por negligencia de la compañía prestadora del servicio, o por robo (caso común en Colombia).

2.3 Modelación de Fugas

Históricamente se han dado diferentes formas de modelar fugas para el problema de diseño y rehabilitación de una red de distribución de agua potable.

2.3.1 *El agua fugada como porcentaje del total del agua consumida*

En un principio se planteaba las fugas como un porcentaje del total del agua consumida en la red, de tal forma que el total del agua fugada fuese de la siguiente forma:

$$AF = k * AC$$

Ecuación 2.4

donde:

AF = Agua fugada

K = Porcentaje de agua fugada esperado

AC = Agua consumida

Esta forma de modelación, si bien permitía una cuantificación más o menos aproximada de la cantidad del agua fugada, no permitía observar su influencia sobre la hidráulica de la red.

En la actualidad se sigue considerando esta como una forma adecuada de simular las pérdidas comerciales en una red (Todini, 2008).

2.3.2 *La utilización de demandas fijas*

Luego para observar los efectos de las fugas en la hidráulica de la red, se utilizó la asignación de demandas fijas con valores determinados en algunos nodos de la red, de tal suerte que se demandase más agua de la que es consumida en un nodo de demanda conocida, o que se demandase una cantidad determinada en un nodo sin demanda (Colombo & Karney, 2002).

Este sistema probó tener deficiencias en el sentido en que era complicado asignar algunos valores de demanda fija sin saber cuánto debían ser, y que además era muy irrealista dado que el caudal "fugado" no dependía de la presión en el punto en la red en determinado momento.

2.3.3 *La utilización de emisores*

Esta es quizá la forma de modelación de fugas más común y aceptada en la actualidad, es además en la cual se basa el presente trabajo (en la sección 3.2.2 se explica con mayor profundidad este método).

Consiste en agregar emisores en algunos o en todos los nodos de la red cuyo caudal fugado se guie por la siguiente ecuación:

$$Q = C_E * \Delta H^\alpha$$

Ecuación 2.5

Esta ha sido considerada una forma más acertada de modelación de fugas en el sentido en que el caudal fugado depende directamente de la presión en el punto en el cual se encuentra el emisor, y además el coeficiente y el exponente del emisor permiten dar características de los agujeros por los cuales se fuga el agua.

2.3.4 Lo que viene

Teniendo en cuenta que las fugas se pueden presentar de forma distribuida a lo largo de todo el segmento de tubería; y dado que la forma común de representación de fugas con emisores, descende de la hipótesis de que existe una descarga constante; la forma de representación de fugas ilustrada en la Ecuación 2.5 pierde validez.

(Todini, 2008) Plantea tres formas de replantear el problema

- ❖ El método de la demanda "no-simétrica"
- ❖ El método del nodo oculto
- ❖ La corrección de la resistencia hidráulica

Dado que estos métodos exceden los alcances del presente trabajo y aún se encuentran en desarrollo, son solo nombrados y no explicados en detalle. Estos métodos se pueden observar en el documento de Todini referenciado en el capítulo 7.

2.4 Costo del agua en Colombia

Se trata en esta sección, exclusivamente el costo medio de operación (CMO) dado que es este en el cual incurren las compañías por concepto de tratamiento y bombeo del agua y es por lo tanto el que se necesita para el desarrollo del presente trabajo.

En Colombia los costos del agua varían de acuerdo con la ciudad en que estos se causen, debido a los diferenciales en los costos de bombeo y de los químicos necesarios para el tratamiento.

En Colombia, el costo del agua por metro cúbico se define como el CMO, el cual es definido de la siguiente manera (Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico (CRA), 2004) :

$$CMO_{ac} = CMO_{ac}^p + CMO_{ac}^c$$

Ecuación 2.6

donde:

CMO_{ac} = Costo medio de operación de acueducto

CMO_{ac}^p = Costo medio de operación particular del prestador en acueducto

CMO_{ac}^c = Costo medio de operación definido por comparación en acueducto

y donde cada uno se define como:

$$CMO_{ac}^p = \frac{(CE_{ac} + CIQ_{ac})}{AP_{ac}(1 - p^*)} + \frac{ITO_{ac}}{AF_{ac} + \left(\frac{AF_{ac}}{1 - IANC} * 0.57 * (IANC - p^*) \right)}$$

Ecuación 2.7

$$CMO_{ac}^c = \frac{(CE_{ac} + CIQ_{ac} + Cab)}{AP_{ac} * (1 - p^*)} + \frac{ITO_{ac}}{AF_{ac} + \left(\frac{AF_{ac}}{1 - IANC} * 0.57 * (IANC - p^*) \right)}$$

Ecuación 2.8

donde:

AP_{ac} : Agua producida en el sistema de acueducto (medida a la salida de la planta) correspondiente al año base.

AF_{ac} : Agua facturada en el sistema de acueducto del año base.

p^* : Nivel máximo aceptable de pérdidas, definido por la CRA (30%).

CE_{ac} : Costo total de la energía para el servicio de acueducto del año base.

CIQ_{ac} : Costo de insumos químicos (subcuenta 753701) asignado al servicio de acueducto, correspondiente al año base.

ITO_{ac} : Impuestos y tasas operativas para el servicio de acueducto

$IANC$: Índice de Agua no Contabilizada del operador.

0.57 : Factor de ajuste por excedente de pérdidas comerciales del operador.

Cab : Costo del suministro de agua en bloque de los prestadores que tienen contrato de compra, del año base.

3 DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR

Para la modelación (diseño) de las redes seleccionadas bajo condiciones de fuga y su respectivo análisis económico para un umbral de diseño de 20 años se utilizará la siguiente metodología.

3.1 Redes seleccionadas para modelación y justificación

Para el presente se utilizaran las siguientes redes de distribución de agua potable:

3.1.1 R 28:

Esta es una red hipotética cuya topología no existe en la realidad, fue creada y es constantemente utilizada por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), con el fin de realizar modelaciones rápidas y prácticas de diversos factores en una red. Dada su sencillez, es una red muy útil para la prueba de diferentes herramientas computacionales y diferentes procesos que estas realizan. Es una red de una topología bastante simétrica y las demandas que tiene asignadas son bastante altas, razón por la cual los resultados obtenidos en ella no son los más confiables. Aún así sigue siendo muy útil como ejemplo del desarrollo del problema.

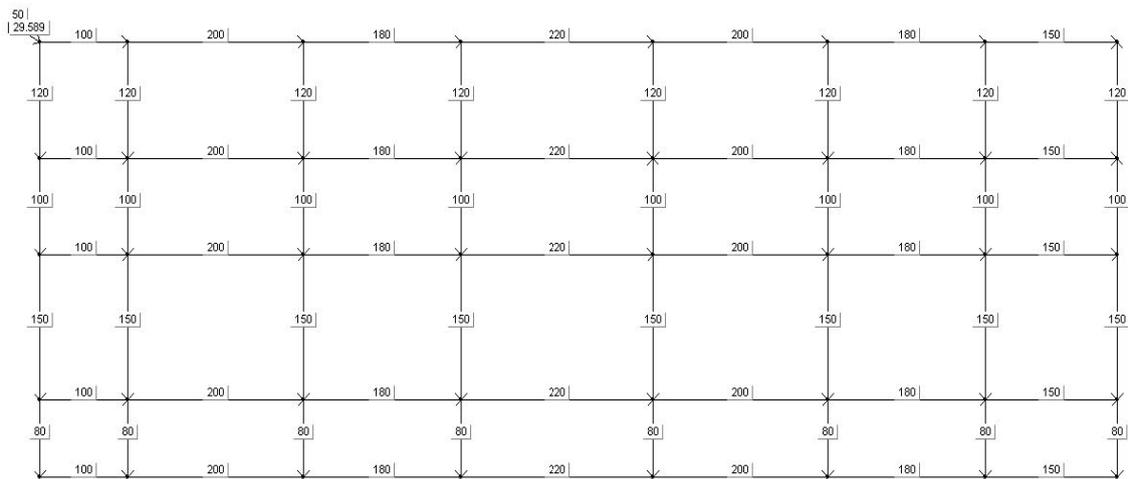


Figura 1: R28

Como muestra la Figura 1, la red cuenta con 67 tuberías, 39 nodos y un tanque de 100 m de altura piezométrica. Tiene una longitud total de 9750 m.

3.1.2 Andalucía Alta (CIACUA, 2006)

Esta red corresponde a una de las dos que abastecen el municipio de Andalucía (Valle del Cauca, Colombia).

Como muestra la Figura 2 la red Andalucía Alta cuenta con 360 tubos, 329 nodos y un embalse de 992 metros de altura piezométrica. La longitud total de la red es de 24362 metros.

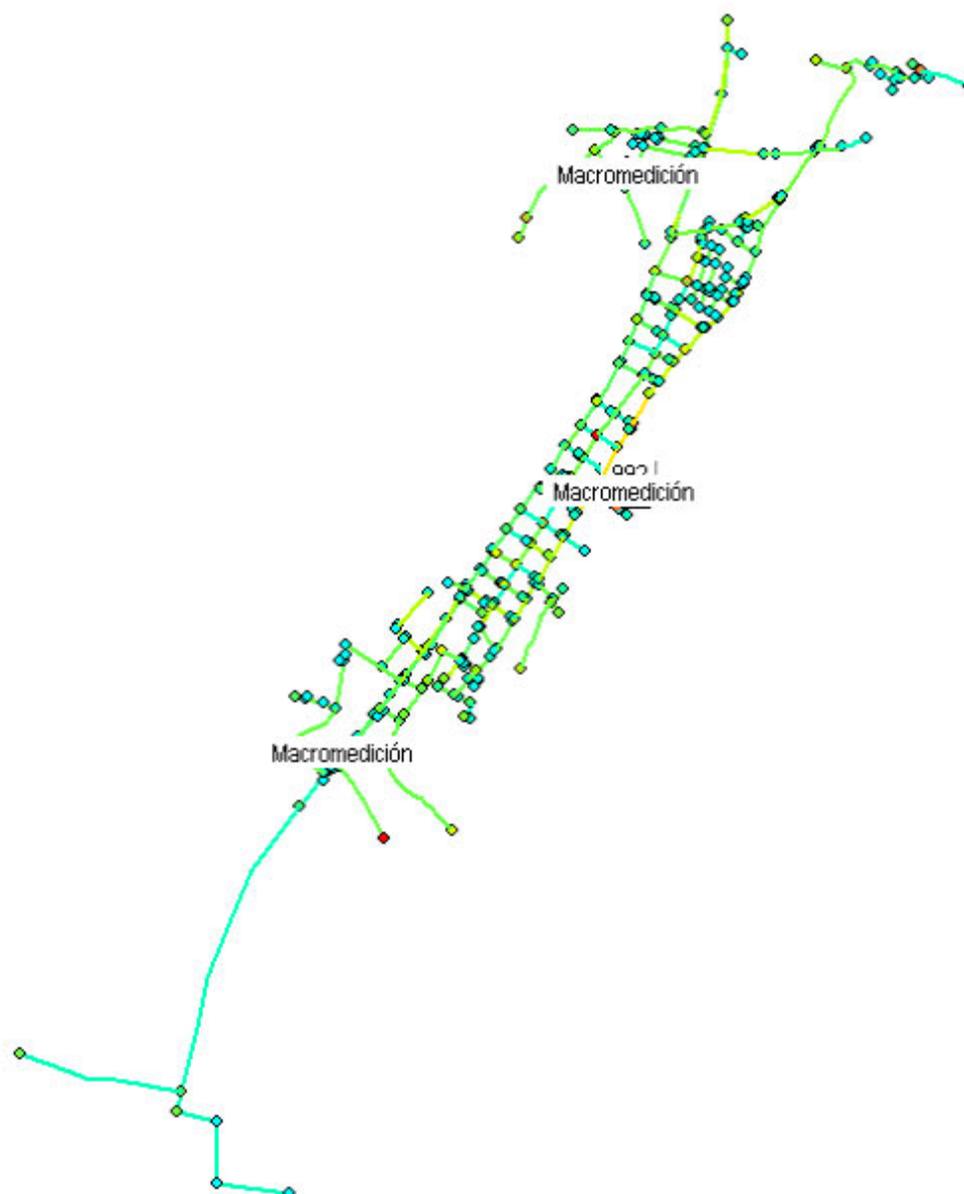


Figura 2. Red Andalucía Alta

3.1.3 Sector 35 (CIACUA, 2002)

Esta red corresponde a un sector que si bien no es uno de los principales, si es un sector de un tamaño importante en el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Bogotá D.C.

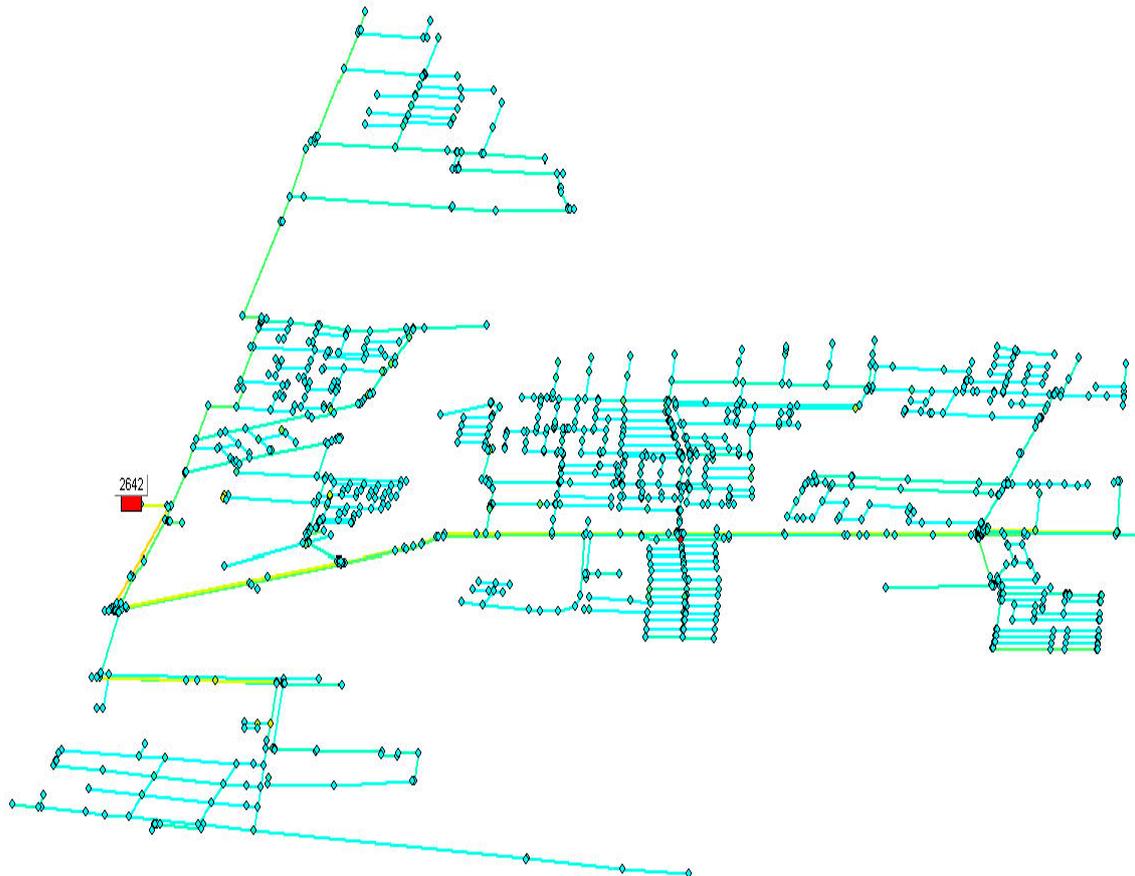


Figura 3. Red Sector 35

Como se muestra en la Figura 3, la red del sector 35 de la ciudad de Bogotá posee 1289 tubos, 1190 nodos. Además posee un embalse con una cabeza piezométrica de 2642 m. Es una red cuya topografía es bastante uniforme. La longitud total de sus tuberías es de 39426 m.

3.1.4 Candelaria (CIACUA, 2006)

Esta red corresponde a la topología real del sistema de abastecimiento de agua potable en funcionamiento en el municipio de Candelaria, Valle del Cauca.

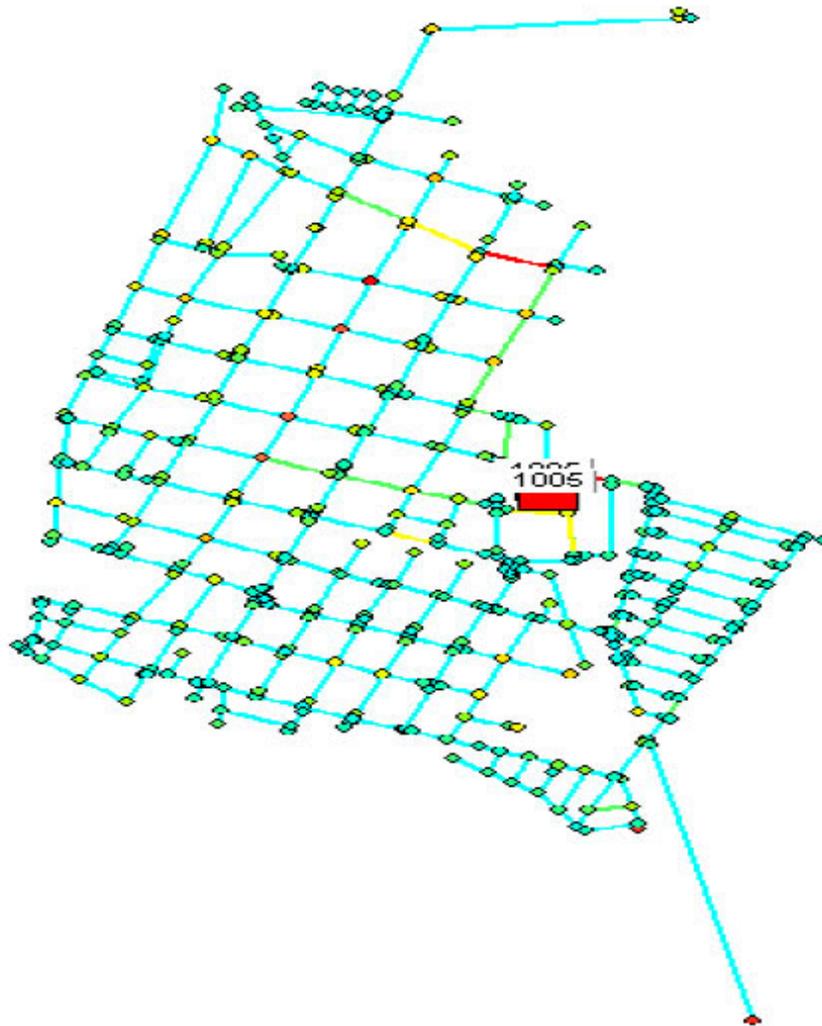


Figura 4. Red Candelaria

Como se muestra en la Figura 4, la red Candelaria, consta de dos embalses con alturas piezométricas de 1005 m cada uno, tiene 460 Nodos y 559 tubos que suman una longitud total de 23170 m. La red tiene una topografía relativamente uniforme.

3.1.5 La Cumbre (CIACUA, 2006)

Esta red corresponde a la que abastece al municipio que lleva el mismo nombre ubicado en el Valle del Cauca, Colombia.

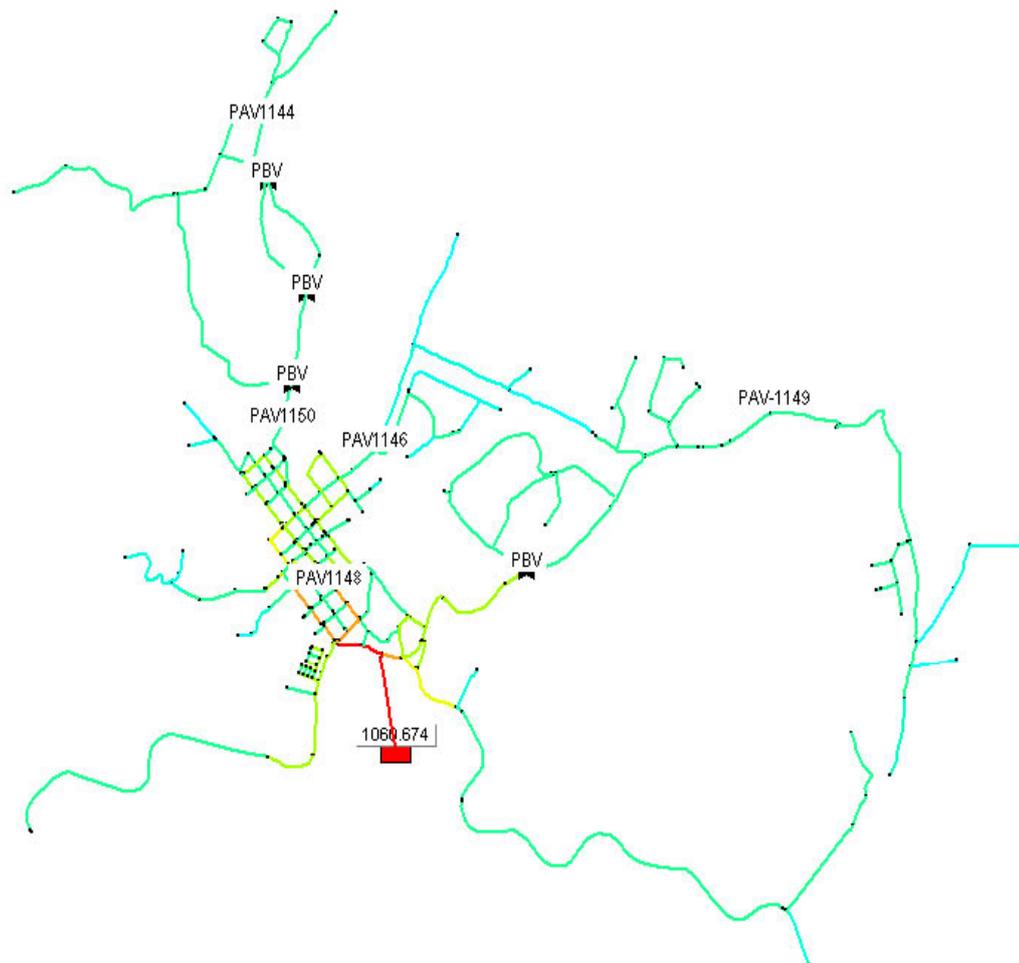


Figura 5. Red La Cumbre

La red mostrada en la Figura 5 consta de 366 Nodos, 408 tubos y un embalse con una altura piezométrica de 1060.674 m, su longitud total es de 29137m. Es una red cuya topografía es muy escarpada.

3.2 Metodología para la modelación hidráulica

Los diseños a realizar en el presente trabajo, se realizan por medio de la metodología de algoritmos genéticos (*ver sección 2.1*). Para los diseños se utilizarán diámetros comerciales en mm; esto debido a que el diámetro real interno (el cual se debería utilizar) depende del fabricante y del material que se utilice, por lo tanto se considera que la utilización de diámetros comerciales es una buena aproximación.

Los diámetros comerciales a utilizar son en mm: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1400, 1500 y 1800

En el presente análisis se diseña cada una de las redes seleccionadas bajo diferentes condiciones de fuga. Cada una de las condiciones de fuga debe representar un IANC por pérdidas técnicas de entre 10% y 40%.

Se realiza la modelación para diferentes condiciones de fuga para observar su influencia en el costo de construcción de la red dado que como se muestra en (Acero, 2003) es relevante y recomendable tener en cuenta las fugas en el diseño de redes de distribución.

3.2.1 Consumos en la red en el tiempo

Acorde con la metodología recomendada para las proyecciones de consumo de acuerdo a proyecciones poblacionales recomendada en el RAS 2000 (MinDesarrollo, 2000). Se obtiene la siguiente tabla de factores multiplicadores para la demanda en cada uno de los nodos acorde con la metodología ilustrada en el Anexo 2.

Se colocan 2 columnas diferentes dado que se supone que la red R28 pertenece a algún sector de la ciudad de Bogotá; la red del sector 35 corresponde, de hecho, a este sector de Bogotá; y las redes Andalucía Alta, La cumbre y Candelaria, corresponden respectivamente a los municipios de Andalucía, La cumbre y Candelaria en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, por lo cual se incluyen las proyecciones realizadas acorde con la población de este departamento

Los factores ilustrados en la Tabla 3.1, son aquellos por los cuales se debe multiplicar la demanda inicial (año 2008) para encontrar la demanda de cada año en cada nodo.

Año	Factor Multiplicador Demanda	
	Bogotá D.C.	Valle del Cauca
2008	1.000	1.000
2009	1.017	1.013
2010	1.035	1.025
2011	1.052	1.038
2012	1.069	1.050
2013	1.086	1.063
2014	1.104	1.075
2015	1.121	1.088
2016	1.138	1.100
2017	1.155	1.113
2018	1.173	1.125
2019	1.190	1.138
2020	1.207	1.150
2021	1.224	1.163
2022	1.242	1.175
2023	1.259	1.188
2024	1.276	1.200
2025	1.294	1.213
2026	1.311	1.225
2027	1.328	1.238
2028	1.345	1.250

Tabla 3.1: Factores Multiplicadores de demanda.

3.2.2 Modelación de fugas

El presente trata exclusivamente el componente del IANC referente a fugas técnicas; esto debido a que las fugas comerciales son muy difíciles de localizar, ya que si corresponden a errores de medición, es difícil saber la ubicación de estos errores; y si corresponde a conexiones ilegales es muy difícil para las compañías encargadas de la distribución de agua detectar la ubicación de este "robo" o "conexión pirata" de agua al sistema.

Para la modelación de fugas en REDES (Saldarriaga, 2007) se sigue la metodología recomendada en el programa EPANET (Rossman, 2000) según la cual las fugas se modelan mediante la colocación de emisores en cada nodo de la red los cuales emiten un caudal acorde con la siguiente ecuación:

$$Q = C_E * \Delta H^\alpha$$

Ecuación 2.5

donde Q es el caudal perdido (liberado) en el emisor; C_E es el coeficiente del emisor, el cual generalmente refleja el tamaño y la forma de la fuga, y es usualmente ajustado para modelar fugas de diferentes magnitudes; ΔH es la diferencia de cabeza de presión a lo largo de la fuga; y α es el exponente del emisor, representa la "elasticidad" del agujero y comúnmente se le asigna un valor de 0.5 para representar el flujo a través de un orificio de tamaño fijo. Una función de emisor es usualmente una representación más realista de las una fuga que la forma tradicional de asignar las fugas como demandas fijas en los nodos. (Colombo & Karney, 2002)

3.2.2.1 Fugas en el tiempo

Dado que se requiere saber el comportamiento del IANC a lo largo del tiempo para realizar el análisis económico. Se plantean dos hipótesis de comportamiento de este índice en el tiempo las cuales no necesariamente comprenden puntos extremos absolutos en el comportamiento posible, pero que sí representan situaciones interesantes en el análisis, donde lo más probable es que el IANC en el tiempo se comporte en algún punto desconocido entre los dos comportamientos modelados.

Estos comportamientos son:

3.2.2.1.1 El IANC es constante en el tiempo

Este caso implica que el IANC a lo largo de cada uno de los años del umbral de análisis sea constante porcentualmente, es decir que para todos y cada uno de los años, el IANC sea estable en un porcentaje dado sobre la cantidad de agua consumida al interior de la red.

3.2.2.1.2 El IANC varía con el tiempo

En este caso se supone que tanto el exponente como el coeficiente de todos y cada uno de los emisores utilizados para simular fugas en la red se mantienen constantes. Esto implica que el IANC varía con el tiempo; esta variación se debe a que puesto que la demanda en la red varía, la presión de la misma también lo hace.

Acorde con la Ecuación 2.5 se observa que el caudal de fuga por el emisor es proporcional a la presión, por lo tanto cualquier variación en la misma (manteniendo constante el coeficiente y el exponente) afecta directamente el caudal fugado y por consiguiente el IANC.

3.2.3 Funciones de costo de las tuberías del sistema utilizadas

Una función de costo es una expresión de forma matemática que permite, a partir de un diámetro determinado, encontrar el costo por metro lineal de una tubería de un diámetro y un material determinado.

Las funciones de costo para el programa REDES (Saldarriaga, 2008) son de la forma:

$$C_i = KD_T^x$$

Ecuación 3.1

$$y \quad C_T = \sum_{i=1}^{N_T} C_i$$

Ecuación 3.2

donde C_i es el costo por tubo, L_T es la longitud de cada tubo, K y X son constantes únicas para cada función de costo, D_T es el diámetro de cada tubo, N_T es el total de tubos y C_T es el costo total de la red.

Si bien el programa REDES (Saldarriaga, 2008) utiliza las funciones de costo usualmente en dólares estadounidenses, las que será utilizadas en el presente trabajo será en pesos colombianos.

Para el diseño en el presente, se utilizan dos de los materiales más utilizados en la construcción de redes de distribución de agua potable en Colombia, el PVC ($ks=0.0015$ mm) y el hierro dúctil ($ks=0.25$ mm).

Luego de realizar un análisis de costo acorde con los precios de los fabricantes (ver Anexo 1), se deducen las siguientes funciones de costo:

Para PVC

$$C_i = 3.9731D_T^{1.88}$$

Ecuación 3.3

Para Hierro Dúctil:

$$C_i = 570.63D_T^{1.1155}$$

Ecuación 3.4

3.3 Metodología para análisis económico

El análisis económico a realizar en el presente, se realiza en pesos colombianos constantes del año 2008, de allí que no se incluya un valor para la inflación, de esta manera los resultados son más confiables y comparables.

Se realiza un análisis de valor presente neto (VPN) utilizando a una tasa de oportunidad de 10.03% igual a la DTF (Portafolio.com, 2008).

3.3.1 Descripción y justificación de parámetros

Para el análisis económico se tendrán en cuenta dos variables fundamentales, la primera el precio de construcción de la red, acorde con la misma función de costos empleada para cada material, y el costo del agua perdida por fugas técnicas a lo largo del período de diseño de la red

3.3.1.1 Costo de construcción del sistema:

Como se explica en la sección 3.2.3 el programa REDES (Saldarriaga, 2008) utiliza las funciones de costo allí escritas. Además, este programa luego de hallar la red mas "óptima"¹ con esta función, brinda el costo total de la misma.

Los valores obtenidos directamente del programa REDES (Saldarriaga, 2008), incluyen solamente el costo de las tuberías, por lo tanto este no será el costo constructivo total de la red sino que se limitará exclusivamente al costo por el concepto de tuberías en la red, dado que el alcance de el presente proyecto se limita a la influencia del agua fugada sobre la compra de las tuberías únicamente.

3.3.1.2 Costo del agua:

Para el presente, se tendrán en cuenta solo los costos de operación en que incurren las compañías en el tratamiento y el bombeo del agua, conocido como CMO. Costos como los de administración, ambientales, etc., no son incluidos en este análisis.

Estudios recientes (Kingdom, Liemberg, & Marin, 2006) han propuesto que el costo del agua para países tercermundistas como Colombia, es de 0.2 US\$ por metro cúbico lo cual con una TRM de \$ 2386 (Portafolio.com, 2008) es de \$ 477 por metro cúbico de agua.

¹ Debido al tamaño del problema matemático, la solución dada por medio del programa REDES no garantiza que la misma sea la solución efectivamente óptima al problema. (ver sección 2.1)

Dado que las ecuaciones ilustradas en la sección 2.4 para el cálculo del CMO requieren de algunos factores confidenciales de las compañías prestadoras del servicio de abastecimiento de agua potable, se utiliza la siguiente metodología simplificada para su cálculo:

Partiendo de la ecuación:

$$CC_{AC} = CMO_{AC} + CMI_{AC} + CMT_{AC}$$

Ecuación 3.5.

Acorde con recomendaciones del Ingeniero Manuel Antonio Serna, Asesor Subdirección Técnica, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA, el valor del CMT es tan pequeño que puede ser despreciado y el valor del CMI es alrededor del 70% del CC total.

Luego acorde con información pública del CC para el estrato 4 (estrato promedio) de varias ciudades (SUI, 2008) y despejando de la Ecuación 3.5. el CMO, se obtienen los resultados de la Tabla 3.2

CIUDAD	CMO (a marzo de 2008 en COP)
Barranquilla	261
Bogota	544
Bucaramanga	220
Cali	254
Cartagena	419
Manizales	358
Medellin	283
Pasto	329
Pereira	279
Popayan	252
Sta Marta	321
PROMEDIO	320

Tabla 3.2: Costos del agua en Colombia

Los valores ilustrados en la Tabla 3.2 muestran una relativa cercanía con el valor planteado en documentos internacionales (Kingdom, Liemberg, & Marin, 2006). Para facilidad y brevedad en el análisis, se utilizará un valor promedio de la Tabla 3.2 para el costo del agua. Este valor es de \$ 320.

² El valor dado en la tabla para la ciudad de Bucaramanga fue suministrado por (Almeida, 2008) a diferencia de los demás calculados a partir de información del SUI (Superintendencia de servicios publicos, 2008)

3.3.2 Factores a hallar y analizar

Para cada una de las redes seleccionadas, para cada material utilizado en los diseños y para cada valor de IANC seleccionado se procede a calcular, mediante una metodología de cálculo del valor presente neto utilizando como tasa de oportunidad la DTF (como se explica al inicio de la sección 3.3) se procederá a calcular el *VPN del agua fugada en la red*.

El análisis de VPN es exclusivo del volumen total de agua fugada anual, el cual se halla a partir del volumen total consumido en la red para cada año.

Los valores utilizados para este cálculo se hallan suponiendo una demanda variable año a año y que durante el año se mantiene constante durante todos los días en todo momento.

Se toma el volumen de agua demandada total (m^3) para cada año acorde con la siguiente expresión:

$$\text{Volumen Total Anual}(m^3) = \sum \left(\frac{d_i * 60 * 60 * 24 * 365}{1000} \right)$$

Ecuación 3.6

donde d_i es la demanda en cada uno de los nodos en litros por segundo ya corregida acorde con la metodología de la sección 3.2.1

Luego se utiliza la siguiente expresión:

$$F = \frac{I * D}{(1 - I)}$$

Ecuación 3.7

donde:

F = Volumen total de agua fugada por año (m^3)
D = El agua total demanda en la red por año (m^3)
I = IANC el cual es conocido

Luego son estos valores del volumen total de agua fugada por año, para cada año del horizonte de análisis, los que alimentan el análisis de VPN con el fin de comparar el valor resultante del VPN del volumen del agua fugada con el costo de las tuberías necesarias para la construcción de la red.

4 DESARROLLO Y RESULTADOS DE MODELOS HIDRÁULICOS

A manera de ejemplo, se mostrará todo el desarrollo de la metodología para la red R28 en PVC junto con sus resultados. Para las otras redes se mostrarán únicamente los resultados sin su desarrollo.

4.1 PARA PVC

4.1.1 R28

4.1.1.1 Características iniciales de la red

Inicialmente se plantea la red R28 descrita en la sección 3.1.1 con las siguientes características a manera de prototipo:

EMBALSE				
ID	LGH	X	Y	Z
	Metros	Metros	Metros	Metros
42	50	-25.26	465.41	15

Tabla 4.1. Características Embalse R28

NODOS									
ID	X	Y	Z	DEMANDA_BASE	ID	X	Y	Z	DEMANDA_BASE
	Metros	Metros	Metros	Lps		Metros	Metros	Metros	Lps
1	0	0	0	0.3	21	700	0	0	1.1
2	0	80	0	0.7	22	700	80	0	3.1
3	0	230	0	0.8	23	700	230	0	3.4
4	0	330	0	0.7	24	700	330	0	3
5	0	450	0	0.4	25	900	450	0	2.3
6	100	450	0	1.2	26	900	330	0	2.7
7	100	330	0	2.1	27	900	230	0	3.1
8	100	230	0	2.4	28	900	80	0	2.8
9	100	80	0	2.2	29	900	0	0	1
10	100	0	0	0.8	30	1080	0	0	0.9
11	300	0	0	1	31	1080	80	0	2.5
12	300	80	0	2.8	32	1080	230	0	2.7
13	300	230	0	3.1	33	1080	330	0	2.4
14	300	330	0	2.7	34	1080	450	0	1.3
15	300	450	0	1.5	35	1230	450	0	0.6
16	480	450	0	2.4	36	1230	330	0	1.1
17	480	330	0	2.9	37	1230	230	0	1.2
18	480	230	0	3.3	38	1230	80	0	1.1
19	480	80	0	3	39	1230	0	0	0.4
20	480	0	0	1	40	700	450	0	2.35

Tabla 4.2. Características Nodos R28

TUBOS						
ID	NODO1	NODO2	DIAMETRO	LONGITUD	RUGOSIDAD	COEF_MENORES
			Milímetros	Metros	Milímetros	
1	2	1	75	80	0.0015	0
2	3	2	150	150	0.0015	0
3	4	3	150	100	0.0015	0
4	5	4	200	120	0.0015	0
5	6	5	150	100	0.0015	0
6	6	7	100	120	0.0015	0
7	7	8	150	100	0.0015	0
8	8	9	100	150	0.0015	0
9	9	10	75	80	0.0015	0
10	15	6	150	200	0.0015	0
11	15	14	75	120	0.0015	0
12	14	13	100	100	0.0015	0
13	13	12	75	150	0.0015	0
14	12	11	50	80	0.0015	0
15	16	15	150	180	0.0015	0
16	16	17	50	120	0.0015	0
17	17	18	50	100	0.0015	0
18	18	19	50	150	0.0015	0
19	19	20	50	80	0.0015	0
20	16	40	100	220	0.0015	0
21	24	40	50	120	0.0015	0
22	24	23	50	100	0.0015	0
23	23	22	50	150	0.0015	0
24	22	21	50	80	0.0015	0
25	25	40	100	200	0.0015	0
26	25	26	50	120	0.0015	0
27	26	27	50	100	0.0015	0
28	27	28	50	150	0.0015	0
29	28	29	50	80	0.0015	0
30	25	34	75	180	0.0015	0
31	34	33	50	120	0.0015	0
32	33	32	50	100	0.0015	0
33	32	31	50	150	0.0015	0
34	31	30	50	80	0.0015	0
35	34	35	50	150	0.0015	0
36	35	36	50	120	0.0015	0
37	36	37	50	100	0.0015	0
38	37	38	50	150	0.0015	0
39	38	39	50	80	0.0015	0
40	30	39	50	150	0.0015	0

Tabla 4.3. Características Tubos R28

TUBOS						
ID	NODO1	NODO2	DIAMETRO	LONGITUD	RUGOSIDAD	COEF_MENORES
			Milímetros	Metros	Milímetros	
41	21	29	75	200	0.0015	0
42	20	21	75	220	0.0015	0
43	11	20	100	180	0.0015	0
44	1	10	75	100	0.0015	0
45	10	11	100	200	0.0015	0
46	29	30	75	180	0.0015	0
47	2	9	100	100	0.0015	0
48	31	38	50	150	0.0015	0
49	9	12	150	200	0.0015	0
50	28	31	75	180	0.0015	0
51	12	19	150	180	0.0015	0
52	22	28	100	200	0.0015	0
53	19	22	150	220	0.0015	0
54	3	8	150	100	0.0015	0
55	32	37	75	150	0.0015	0
56	8	13	150	200	0.0015	0
57	27	32	100	180	0.0015	0
58	13	18	150	180	0.0015	0
59	23	27	100	200	0.0015	0
60	18	23	150	220	0.0015	0
61	4	7	150	100	0.0015	0
62	33	36	50	150	0.0015	0
63	7	14	150	200	0.0015	0
64	26	33	75	180	0.0015	0
65	14	17	150	180	0.0015	0
66	24	26	100	200	0.0015	0
67	17	24	100	220	0.0015	0
69	42	5	250	29.589453	0.0015	0

Tabla 4.4. Características tubos R28 (Continuación)

A partir de estos datos base, acorde con las proyecciones de demanda realizadas para la ciudad de Bogotá en la sección 3.2.1 (se supone que la red R28 pertenece a algún sector de esta ciudad) y se realiza la tabla de proyecciones de demanda año a año por nodo.

Nodo	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	0.3	0.305	0.310	0.316	0.321	0.326
2	0.7	0.712	0.724	0.736	0.748	0.760
3	0.8	0.814	0.828	0.841	0.855	0.869
4	0.7	0.712	0.724	0.736	0.748	0.760
5	0.4	0.407	0.414	0.421	0.428	0.435
6	1.2	1.221	1.241	1.262	1.283	1.304
7	2.1	2.136	2.173	2.209	2.245	2.281
8	2.4	2.441	2.483	2.524	2.566	2.607
9	2.2	2.238	2.276	2.314	2.352	2.390
10	0.8	0.814	0.828	0.841	0.855	0.869
11	1	1.017	1.035	1.052	1.069	1.086
12	2.8	2.848	2.897	2.945	2.993	3.042
13	3.1	3.154	3.207	3.261	3.314	3.368
14	2.7	2.747	2.793	2.840	2.886	2.933
15	1.5	1.526	1.552	1.578	1.604	1.629
16	2.4	2.441	2.483	2.524	2.566	2.607
17	2.9	2.950	3.000	3.050	3.100	3.150
18	3.3	3.357	3.414	3.471	3.528	3.585
19	3	3.052	3.104	3.155	3.207	3.259
20	1	1.017	1.035	1.052	1.069	1.086
21	1.1	1.119	1.138	1.157	1.176	1.195
22	3.1	3.154	3.207	3.261	3.314	3.368
23	3.4	3.459	3.517	3.576	3.635	3.694
24	3	3.052	3.104	3.155	3.207	3.259
25	2.3	2.340	2.379	2.419	2.459	2.499
26	2.7	2.747	2.793	2.840	2.886	2.933
27	3.1	3.154	3.207	3.261	3.314	3.368
28	2.8	2.848	2.897	2.945	2.993	3.042
29	1	1.017	1.035	1.052	1.069	1.086
30	0.9	0.916	0.931	0.947	0.962	0.978
31	2.5	2.543	2.586	2.629	2.673	2.716
32	2.7	2.747	2.793	2.840	2.886	2.933
33	2.4	2.441	2.483	2.524	2.566	2.607
34	1.3	1.322	1.345	1.367	1.390	1.412
35	0.6	0.610	0.621	0.631	0.641	0.652
36	1.1	1.119	1.138	1.157	1.176	1.195
37	1.2	1.221	1.241	1.262	1.283	1.304
38	1.1	1.119	1.138	1.157	1.176	1.195
39	0.4	0.407	0.414	0.421	0.428	0.435
40	2.35	2.391	2.431	2.472	2.512	2.553
Volumen Consumido	2344702	2385185	2425668	2466152	2506635	2547119

Tabla 4.5. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m³) R28

Nodo	2014	2015	2016	2017	2018
1	0.331	0.336	0.341	0.347	0.352
2	0.773	0.785	0.797	0.809	0.821
3	0.883	0.897	0.911	0.924	0.938
4	0.773	0.785	0.797	0.809	0.821
5	0.441	0.448	0.455	0.462	0.469
6	1.324	1.345	1.366	1.386	1.407
7	2.318	2.354	2.390	2.426	2.463
8	2.649	2.690	2.732	2.773	2.814
9	2.428	2.466	2.504	2.542	2.580
10	0.883	0.897	0.911	0.924	0.938
11	1.104	1.121	1.138	1.155	1.173
12	3.090	3.138	3.187	3.235	3.283
13	3.421	3.475	3.528	3.582	3.635
14	2.980	3.026	3.073	3.120	3.166
15	1.655	1.681	1.707	1.733	1.759
16	2.649	2.690	2.732	2.773	2.814
17	3.200	3.250	3.301	3.351	3.401
18	3.642	3.699	3.756	3.813	3.870
19	3.311	3.363	3.414	3.466	3.518
20	1.104	1.121	1.138	1.155	1.173
21	1.214	1.233	1.252	1.271	1.290
22	3.421	3.475	3.528	3.582	3.635
23	3.752	3.811	3.870	3.928	3.987
24	3.311	3.363	3.414	3.466	3.518
25	2.538	2.578	2.618	2.657	2.697
26	2.980	3.026	3.073	3.120	3.166
27	3.421	3.475	3.528	3.582	3.635
28	3.090	3.138	3.187	3.235	3.283
29	1.104	1.121	1.138	1.155	1.173
30	0.993	1.009	1.024	1.040	1.055
31	2.759	2.802	2.845	2.888	2.932
32	2.980	3.026	3.073	3.120	3.166
33	2.649	2.690	2.732	2.773	2.814
34	1.435	1.457	1.480	1.502	1.524
35	0.662	0.673	0.683	0.693	0.704
36	1.214	1.233	1.252	1.271	1.290
37	1.324	1.345	1.366	1.386	1.407
38	1.214	1.233	1.252	1.271	1.290
39	0.441	0.448	0.455	0.462	0.469
40	2.593	2.634	2.675	2.715	2.756
Volumen Consumido	2587602	2628086	2668569	2709052	2749536

Tabla 4.6. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m³) R28 (continuación)

Nodo	2019	2020	2021	2022	2023
1	0.357	0.362	0.367	0.373	0.378
2	0.833	0.845	0.857	0.869	0.881
3	0.952	0.966	0.980	0.993	1.007
4	0.833	0.845	0.857	0.869	0.881
5	0.476	0.483	0.490	0.497	0.504
6	1.428	1.449	1.469	1.490	1.511
7	2.499	2.535	2.571	2.608	2.644
8	2.856	2.897	2.939	2.980	3.022
9	2.618	2.656	2.694	2.732	2.770
10	0.952	0.966	0.980	0.993	1.007
11	1.190	1.207	1.224	1.242	1.259
12	3.332	3.380	3.428	3.477	3.525
13	3.689	3.742	3.796	3.849	3.903
14	3.213	3.259	3.306	3.353	3.399
15	1.785	1.811	1.837	1.863	1.888
16	2.856	2.897	2.939	2.980	3.022
17	3.451	3.501	3.551	3.601	3.651
18	3.927	3.984	4.041	4.098	4.155
19	3.570	3.622	3.673	3.725	3.777
20	1.190	1.207	1.224	1.242	1.259
21	1.309	1.328	1.347	1.366	1.385
22	3.689	3.742	3.796	3.849	3.903
23	4.046	4.104	4.163	4.222	4.281
24	3.570	3.622	3.673	3.725	3.777
25	2.737	2.777	2.816	2.856	2.896
26	3.213	3.259	3.306	3.353	3.399
27	3.689	3.742	3.796	3.849	3.903
28	3.332	3.380	3.428	3.477	3.525
29	1.190	1.207	1.224	1.242	1.259
30	1.071	1.086	1.102	1.118	1.133
31	2.975	3.018	3.061	3.104	3.147
32	3.213	3.259	3.306	3.353	3.399
33	2.856	2.897	2.939	2.980	3.022
34	1.547	1.569	1.592	1.614	1.637
35	0.714	0.724	0.735	0.745	0.755
36	1.309	1.328	1.347	1.366	1.385
37	1.428	1.449	1.469	1.490	1.511
38	1.309	1.328	1.347	1.366	1.385
39	0.476	0.483	0.490	0.497	0.504
40	2.796	2.837	2.877	2.918	2.959
Volumen Consumido	2790019	2830503	2870986	2911470	2951953

Tabla 4.7. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m³) R28 (continuación)

Nodo	2024	2025	2026	2027	2028
1	0.383	0.388	0.393	0.398	0.404
2	0.893	0.905	0.918	0.930	0.942
3	1.021	1.035	1.049	1.062	1.076
4	0.893	0.905	0.918	0.930	0.942
5	0.511	0.517	0.524	0.531	0.538
6	1.532	1.552	1.573	1.594	1.614
7	2.680	2.716	2.753	2.789	2.825
8	3.063	3.104	3.146	3.187	3.229
9	2.808	2.846	2.884	2.922	2.960
10	1.021	1.035	1.049	1.062	1.076
11	1.276	1.294	1.311	1.328	1.345
12	3.574	3.622	3.670	3.719	3.767
13	3.956	4.010	4.063	4.117	4.170
14	3.446	3.493	3.539	3.586	3.632
15	1.914	1.940	1.966	1.992	2.018
16	3.063	3.104	3.146	3.187	3.229
17	3.701	3.751	3.801	3.851	3.901
18	4.212	4.269	4.326	4.383	4.440
19	3.829	3.881	3.932	3.984	4.036
20	1.276	1.294	1.311	1.328	1.345
21	1.404	1.423	1.442	1.461	1.480
22	3.956	4.010	4.063	4.117	4.170
23	4.339	4.398	4.457	4.515	4.574
24	3.829	3.881	3.932	3.984	4.036
25	2.935	2.975	3.015	3.055	3.094
26	3.446	3.493	3.539	3.586	3.632
27	3.956	4.010	4.063	4.117	4.170
28	3.574	3.622	3.670	3.719	3.767
29	1.276	1.294	1.311	1.328	1.345
30	1.149	1.164	1.180	1.195	1.211
31	3.191	3.234	3.277	3.320	3.363
32	3.446	3.493	3.539	3.586	3.632
33	3.063	3.104	3.146	3.187	3.229
34	1.659	1.682	1.704	1.726	1.749
35	0.766	0.776	0.786	0.797	0.807
36	1.404	1.423	1.442	1.461	1.480
37	1.532	1.552	1.573	1.594	1.614
38	1.404	1.423	1.442	1.461	1.480
39	0.511	0.517	0.524	0.531	0.538
40	2.999	3.040	3.080	3.121	3.161
Volumen Consumido	2992436	3032920	3073403	3113887	3154370

Tabla 4.8. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m³) R28
 (continuación)

La demanda ilustrada entre la Tabla 4.5 y la Tabla 4.8 será la que se utilice para observar la variación en el agua fugada año a año durante el tiempo umbral de análisis acorde con las dos condiciones diferentes de IANC ilustradas en la sección 3.2.2.1.

El volumen consumido ilustrado en la Tabla 4.5 es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\text{Volumen Consumido} = \sum_{i=1}^{NN} \frac{d_i \cdot 60 \cdot 60 \cdot 365}{1000}$$

Ecuación 4.1

donde NN= número de nodos y d_i = Demanda nodo i en l/s

Se observa que en esta se supone la demanda constante durante todo el año.

4.1.1.2 Resultados de diseño

A partir de los datos iniciales de la red, se varían los valores básicos de los emisores, acorde con lo comentado en la sección 3.2.2, el exponente del emisor para todas y cada una de las modelaciones realizadas se utiliza constante para todos cada uno de los nodos con un valor de 0.5, luego, variando el valor de los coeficientes de los emisores (uniformes para todos y cada uno de los nodos de la red) se buscan cuatro valores diferentes del IANC entre 7% y 40% y se realiza el diseño de la red para cada uno de estos. A continuación se ilustran los valores de los coeficientes de los emisores con su respectivo IANC y sus respectivos resultados de diseño para una presión mínima objetivo de 15 M.C.A. (Saldarriaga, Programa REDES, 2008).

IANC (%)	10.074	18.021	27.823	38.32
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m^(1/2))	0.05	0.1	0.2	0.3
Ver resultados en:	Tabla 4.10	Tabla 4.11	Tabla 4.12	Tabla 4.13

Tabla 4.9 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños R28 PVC

A continuación se muestran las tablas con los resultados de diámetro para cada uno de los modelos.

TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO
	Milímetros		Milímetros		Milímetros		Milímetros
1	50	18	50	35	50	52	50
2	75	19	50	36	50	53	50
3	100	20	200	37	50	54	75
4	100	21	150	38	50	55	50
5	250	22	100	39	50	56	75
6	100	23	75	40	50	57	50
7	100	24	50	41	50	58	75
8	75	25	100	42	50	59	75
9	50	26	50	43	50	60	50
10	200	27	75	44	50	61	50
11	100	28	50	45	50	62	50
12	100	29	50	46	50	63	50
13	75	30	75	47	50	64	75
14	50	31	50	48	50	65	50
15	200	32	50	49	75	66	100
16	75	33	50	50	50	67	50
17	75	34	50	51	75	69	250

Tabla 4.10. Resultados de diámetros para R28 en PVC para IANC=10.074%

TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO
	Milímetros		Milímetros		Milímetros		Milímetros
1	50	18	75	35	50	52	50
2	100	19	50	36	50	53	50
3	100	20	200	37	50	54	75
4	150	21	200	38	50	55	50
5	250	22	100	39	50	56	50
6	100	23	75	40	50	57	75
7	75	24	50	41	50	58	50
8	50	25	75	42	50	59	50
9	50	26	50	43	50	60	50
10	200	27	75	44	50	61	50
11	100	28	50	45	50	62	50
12	75	29	50	46	50	63	50
13	50	30	50	47	50	64	100
14	50	31	50	48	50	65	50
15	200	32	75	49	50	66	150
16	100	33	50	50	50	67	50
17	75	34	50	51	50	69	250

Tabla 4.11. Resultados de diámetros para R28 en PVC para IANC=18.021%

TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO
	Milímetros		Milímetros		Milímetros		Milímetros
1	75	18	75	35	75	52	75
2	75	19	50	36	75	53	75
3	75	20	200	37	75	54	50
4	75	21	150	38	75	55	50
5	250	22	75	39	75	56	75
6	75	23	75	40	75	57	75
7	75	24	75	41	75	58	75
8	75	25	75	42	75	59	75
9	75	26	75	43	75	60	50
10	250	27	75	44	75	61	75
11	75	28	75	45	50	62	75
12	75	29	75	46	75	63	75
13	75	30	75	47	75	64	75
14	50	31	75	48	50	65	75
15	200	32	75	49	50	66	150
16	75	33	75	50	75	67	75
17	75	34	75	51	75	69	250

Tabla 4.12. Resultados de diámetros para R28 en PVC para IANC=27.823%

TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO	TUBO	DIAMETRO
	Milímetros		Milímetros		Milímetros		Milímetros
1	75	18	75	35	75	52	75
2	75	19	75	36	75	53	75
3	150	20	200	37	75	54	75
4	150	21	150	38	75	55	75
5	250	22	75	39	75	56	75
6	75	23	75	40	75	57	75
7	75	24	75	41	75	58	75
8	75	25	75	42	75	59	75
9	75	26	75	43	75	60	75
10	250	27	75	44	75	61	75
11	75	28	75	45	75	62	75
12	75	29	75	46	75	63	75
13	75	30	75	47	75	64	75
14	75	31	75	48	75	65	75
15	200	32	75	49	75	66	150
16	150	33	75	50	75	67	75
17	75	34	75	51	75	69	250

Tabla 4.13. Resultados de diámetros para R28 en PVC para IANC=38.32%

Además se tienen los siguientes resultados para la red R28 sin fugas, es decir para un IANC de 0%

TUBO	DIAMETRO Milímetros	TUBO	DIAMETRO Milímetros	TUBO	DIAMETRO Milímetros	TUBO	DIAMETRO Milímetros
1	50	18	50	35	50	52	50
2	75	19	50	36	50	53	50
3	150	20	200	37	50	54	75
4	150	21	150	38	50	55	50
5	200	22	100	39	50	56	50
6	50	23	75	40	50	57	50
7	50	24	50	41	50	58	50
8	50	25	75	42	50	59	50
9	50	26	50	43	50	60	50
10	200	27	75	44	50	61	50
11	75	28	50	45	50	62	50
12	75	29	50	46	50	63	50
13	50	30	50	47	50	64	100
14	50	31	50	48	50	65	50
15	200	32	75	49	50	66	100
16	75	33	50	50	50	67	50
17	50	34	50	51	50	69	250

Tabla 4.14. Resultados de diámetros para R28 en PVC para IANC=0%

Gráficamente los resultados para esta red se dan de la siguiente manera:

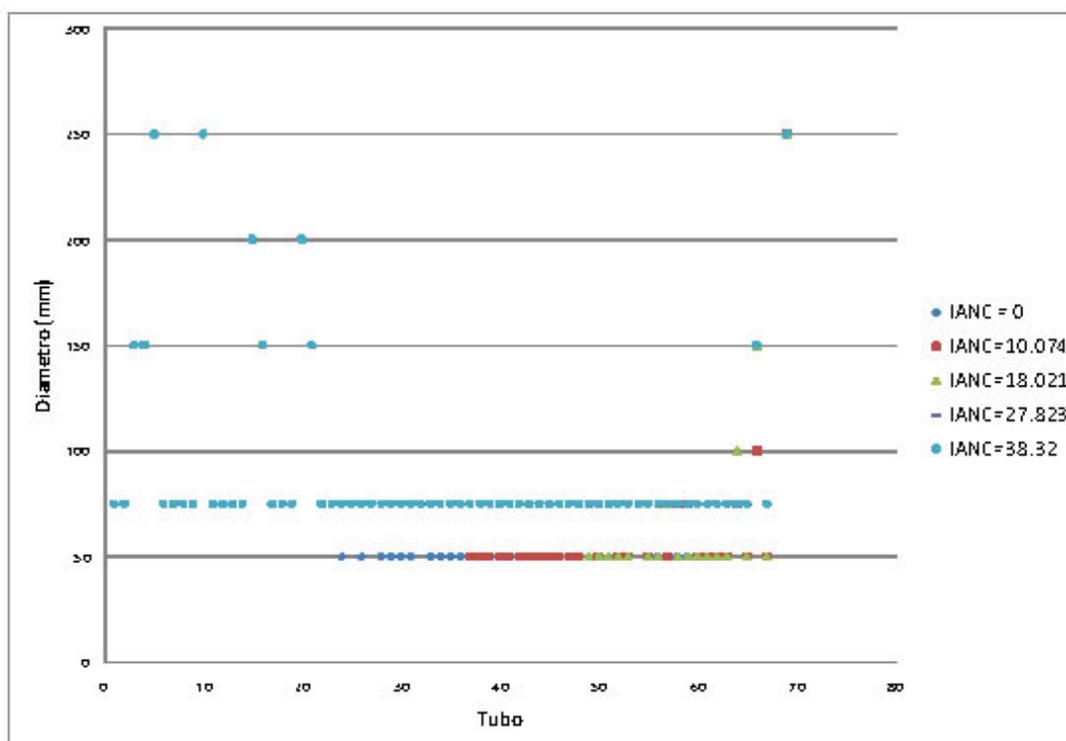


Gráfico 4.1. Resultados para diámetros R28 en PVC

4.1.1.3 Variaciones del IANC en el tiempo

Acorde con la segunda suposición de comportamiento de las fugas en el tiempo ilustrado en la sección 3.2.2.1.2 y utilizando el dimensionamiento para cada caso de IANC ilustrado entre la Tabla 4.10 y la Tabla 4.14 se obtienen los siguientes valores de IANC para cada año.

Año	%	%	%	%
2008	14.27	24.568	37.076	47.649
2009	14.013	24.178	36.552	47.128
2010	13.763	23.797	36.036	46.613
2011	13.519	23.423	35.528	46.08
2012	13.28	23.057	35.026	45.604
2013	13.047	22.698	34.532	45.109
2014	12.819	22.346	34.044	44.619
2015	12.596	22.001	33.563	44.136
2016	12.378	21.662	33.089	43.658
2017	12.166	21.329	32.62	43.185
2018	11.957	21.003	32.158	42.718
2019	11.751	20.682	31.701	42.257
2020	11.552	20.367	31.25	41.801
2021	11.355	20.057	30.805	41.349
2022	11.161	19.752	30.364	40.903
2023	10.972	19.452	29.929	40.461
2024	10.786	19.157	29.499	40.024
2025	10.603	18.866	29.072	39.591
2026	10.424	18.58	28.652	39.163
2027	10.248	18.298	28.235	38.74
2028	10.106	18.021	27.823	38.32

Tabla 4.15. IANC año a año suponiendo coeficientes y exponentes de emisores constantes en R28 en PVC.

Nótese que los IANC mostrados en la Tabla 4.9 corresponden a los IANC para el año 2028 que son los que se utilizaron para los diferentes diseños. Corresponden a este año dado que es este el que corresponde al umbral de diseño. En la Tabla 4.15 se observa el IANC variable año a año cuando los coeficientes y los exponentes de los emisores permanecen constantes.

A continuación se ilustra gráficamente el comportamiento del IANC acorde con la Tabla 4.15

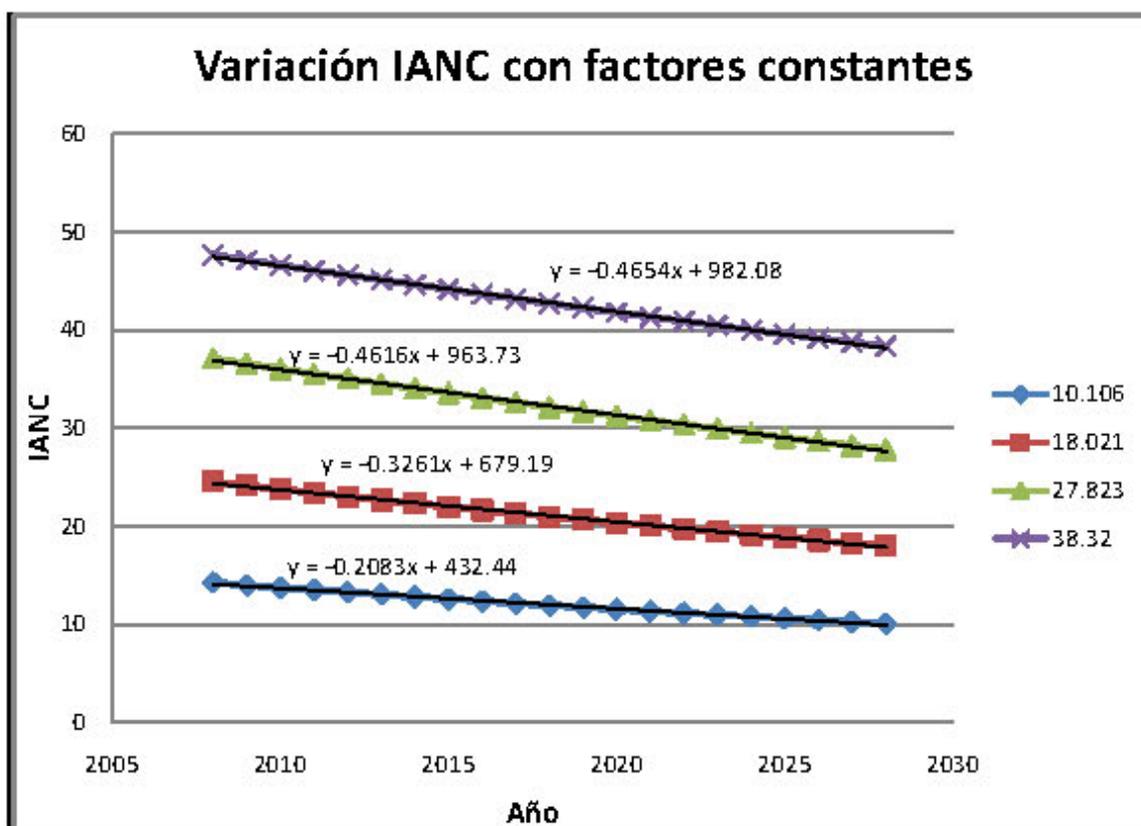


Gráfico 4.2 Variación del IANC con factores de emisores constantes para R28 en PVC

4.1.1.4 Cálculo de la cantidad de agua fugada

Acorde con la Ecuación 3.7 y con el volumen total demandado mostrado entre la Tabla 4.5 y la Tabla 4.8, se calcula el volumen de agua fugada para cada uno de los años para las dos suposiciones del comportamiento del IANC ilustradas en la sección 3.2.2.1.

IANC DISEÑO (AÑO 2028)	10.106	18.021	27.823	38.32
2008	390282	763663	1381542	2134108
2009	388705	760584	1374090	2126059
2010	387125	757498	1366572	2117888
2011	385517	754335	1359000	2107572
2012	383857	751147	1351270	2101489
2013	382186	747904	1343513	2093203
2014	380478	744618	1335623	2084762
2015	378740	741298	1327670	2076349
2016	376978	737912	1319668	2067807
2017	375234	734469	1311506	2059147

Tabla 4.16. Volumen de agua fugada R28 con IANC variable (m³) en PVC

IANC DISEÑO (AÑO 2028)	10.106	18.021	27.823	38.32
2018	373411	731021	1303316	2050464
2019	371511	727492	1294988	2041769
2020	369686	723932	1286592	2032988
2021	367760	720305	1278138	2024047
2022	365773	716620	1269514	2015125
2023	363805	712884	1260850	2006063
2024	361786	709104	1252094	1996953
2025	359722	705242	1243135	1987722
2026	357653	701349	1234220	1978462
2027	355548	697387	1225118	1969180
2028	354618	693408	1215956	1959719
TOTAL (M3)	7830376	15332171	27334374	43030876

Tabla 4.17. Volumen de agua fugada R28 con IANC variable (m³) en PVC (continuación)

IANC DISEÑO (AÑO 2028)	10.106	18.021	27.823	38.32
2008	263594	515423	903842	1456695
2009	268146	524322	919448	1481846
2010	272697	533222	935054	1506998
2011	277248	542121	950659	1532149
2012	281799	551020	966265	1557300
2013	286350	559919	981871	1582451
2014	290902	568819	997476	1607602
2015	295453	577718	1013082	1632754
2016	300004	586617	1028688	1657905
2017	304555	595516	1044293	1683056
2018	309106	604416	1059899	1708207
2019	313658	613315	1075505	1733358
2020	318209	622214	1091110	1758509
2021	322760	631113	1106716	1783661
2022	327311	640013	1122322	1808812
2023	331862	648912	1137927	1833963
2024	336414	657811	1153533	1859114
2025	340965	666710	1169139	1884265
2026	345516	675610	1184744	1909417
2027	350067	684509	1200350	1934568
2028	354618	693408	1215956	1959719
TOTAL (M3)	6491234	12692727	22257881	35872349

Tabla 4.18. Volumen de agua fugada R28 con IANC constante (m³) en PVC

Gráficamente los resultados anteriores se muestran a continuación:

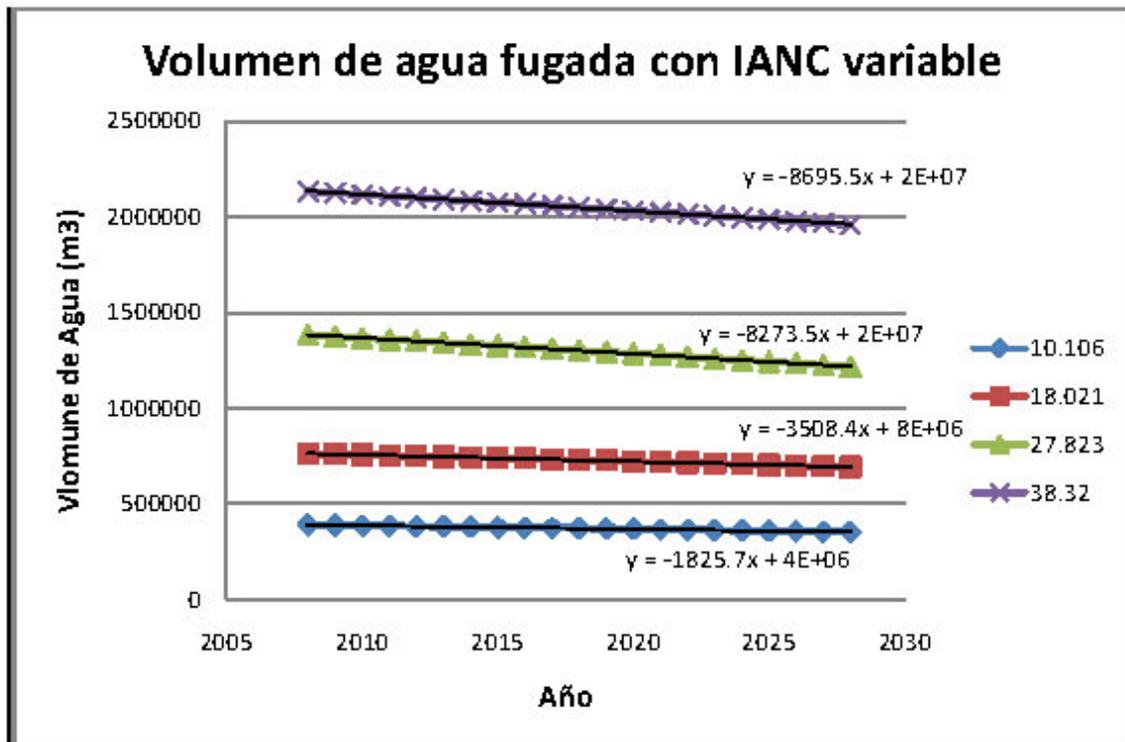


Gráfico 4.3. Volumen de agua fugada R28 en PVC con IANC variable

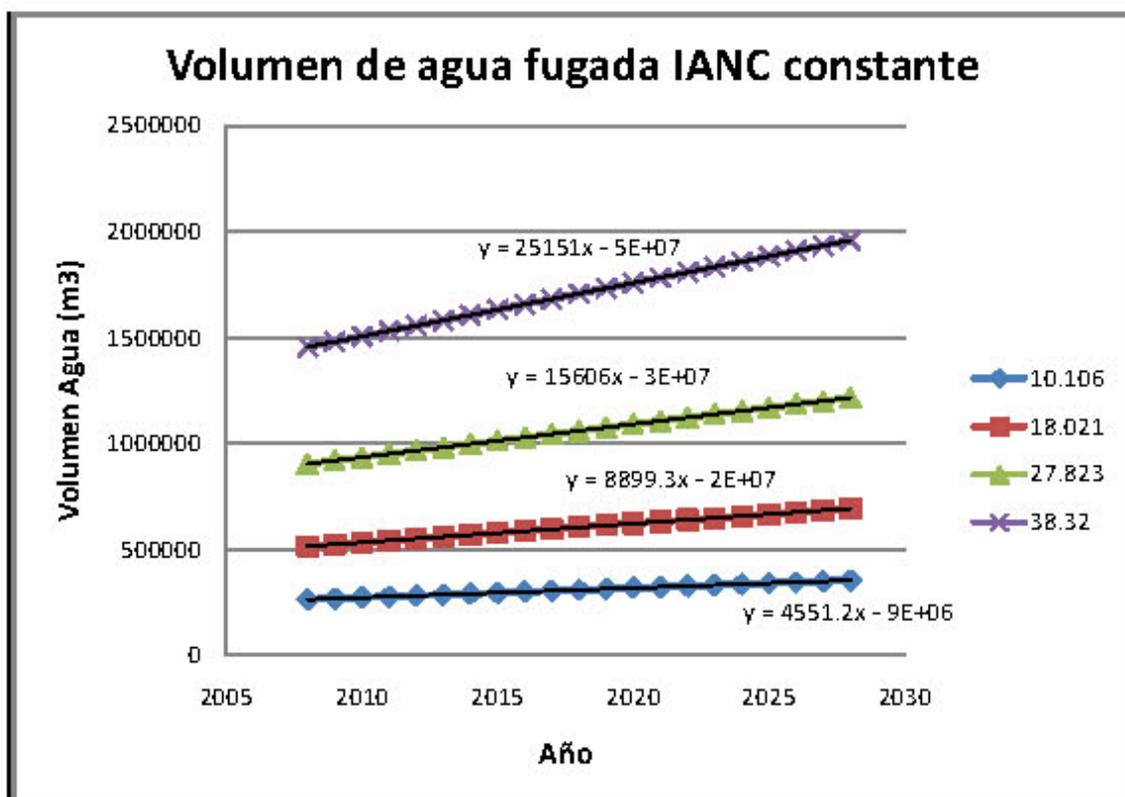


Gráfico 4.4. Volumen de agua fugada R28 en PVC con IANC constante

4.1.2 Andalucía Alta

Para esta red, se ilustrarán solamente los resultados de la modelación hidráulica más relevantes para el análisis que concierne el presente.

Se ilustran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	8.719	17.235	27.729	37.118
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0011	0.0024	0.0044	0.0068

Tabla 4.19 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Andalucía Alta en PVC

Luego, de manera gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

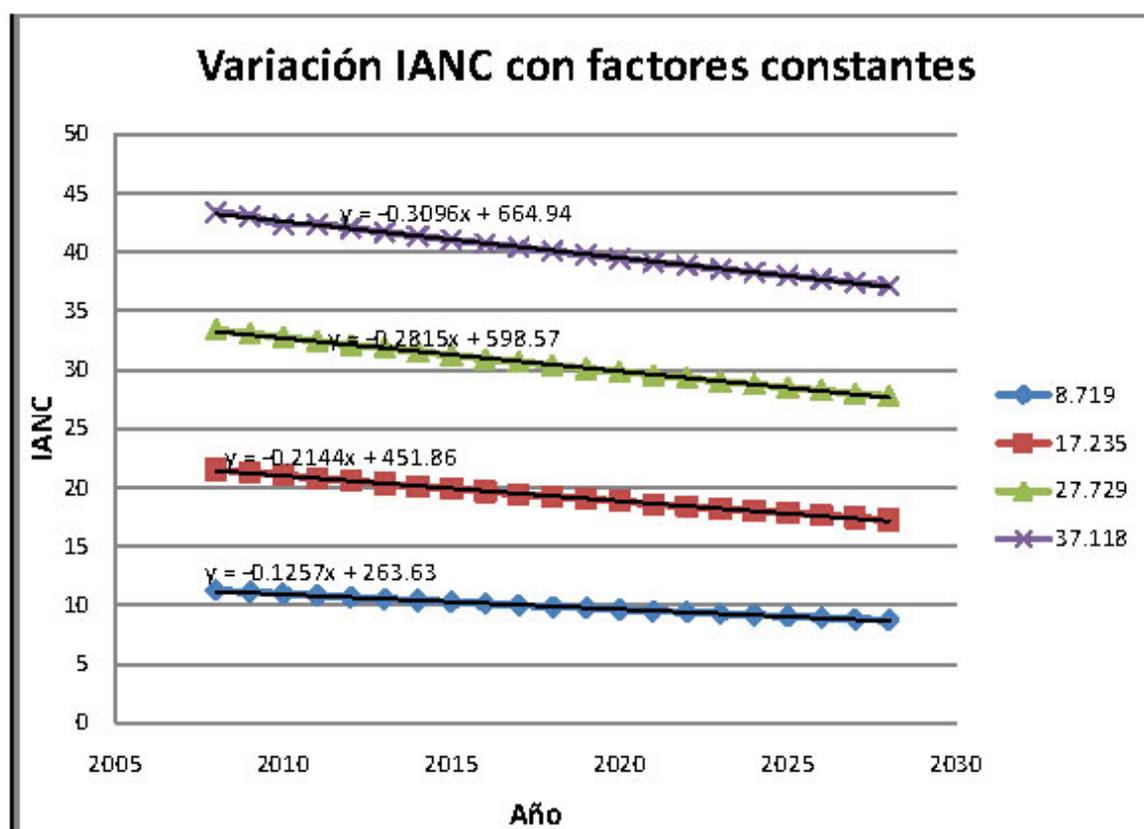


Gráfico 4.5 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Andalucía Alta en PVC.

Luego de tener el comportamiento del IANC en el tiempo se procede a calcular el volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1.

Gráficamente los resultados se representan de la siguiente manera:

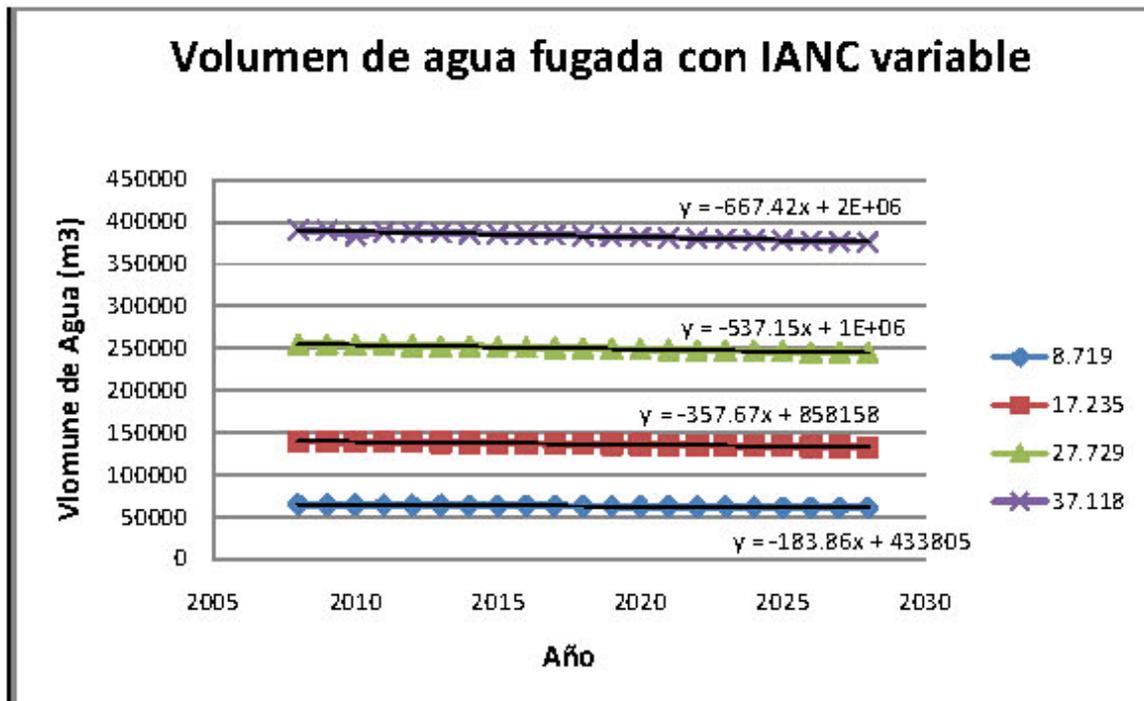


Gráfico 4.6. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en PVC con IANC variable

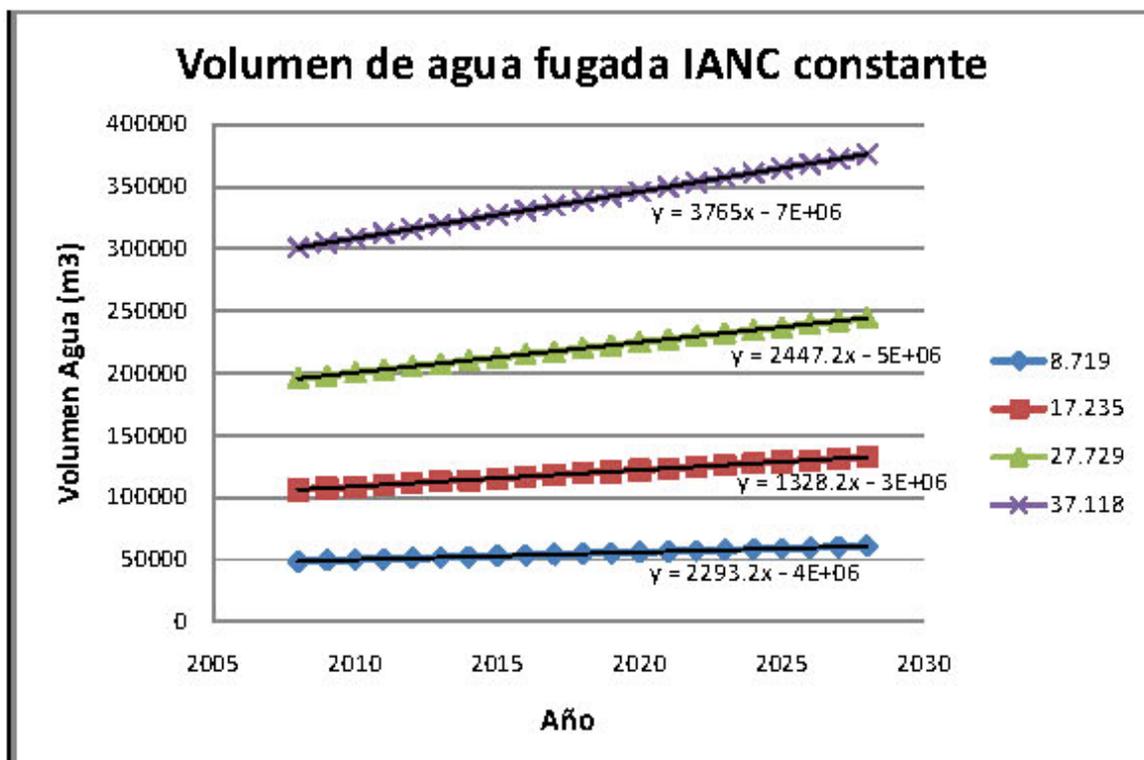


Gráfico 4.7. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en PVC con IANC constante

4.1.3 Sector 35 Bogotá

Para esta red, se ilustrarán solamente los resultados de la modelación hidráulica más relevantes para el análisis que concierne el presente.

Se ilustran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	9.711	17.972	28.047	37.34
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.001	0.002	0.0034	0.005

Tabla 4.20 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Sector 35 en PVC

Luego, de manera gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

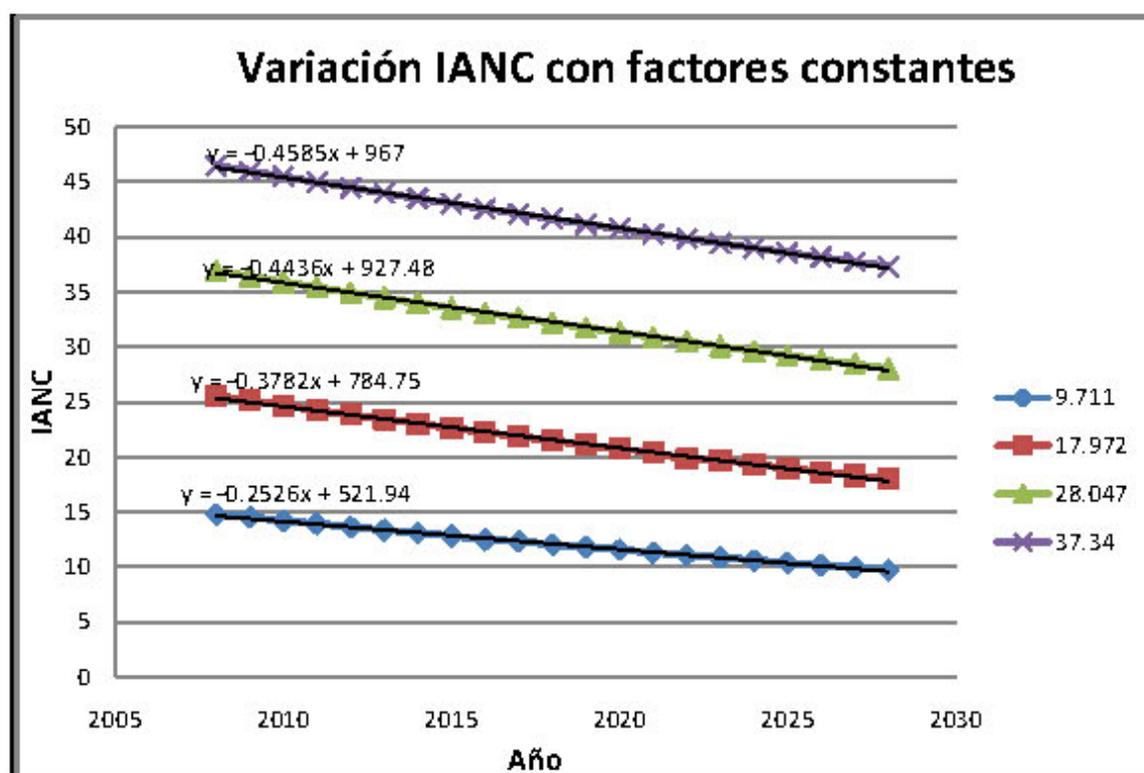


Gráfico 4.8 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Sector 35 en PVC.

Luego de tener el comportamiento del IANC en el tiempo se procede a calcular el volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1. Gráficamente se tiene:

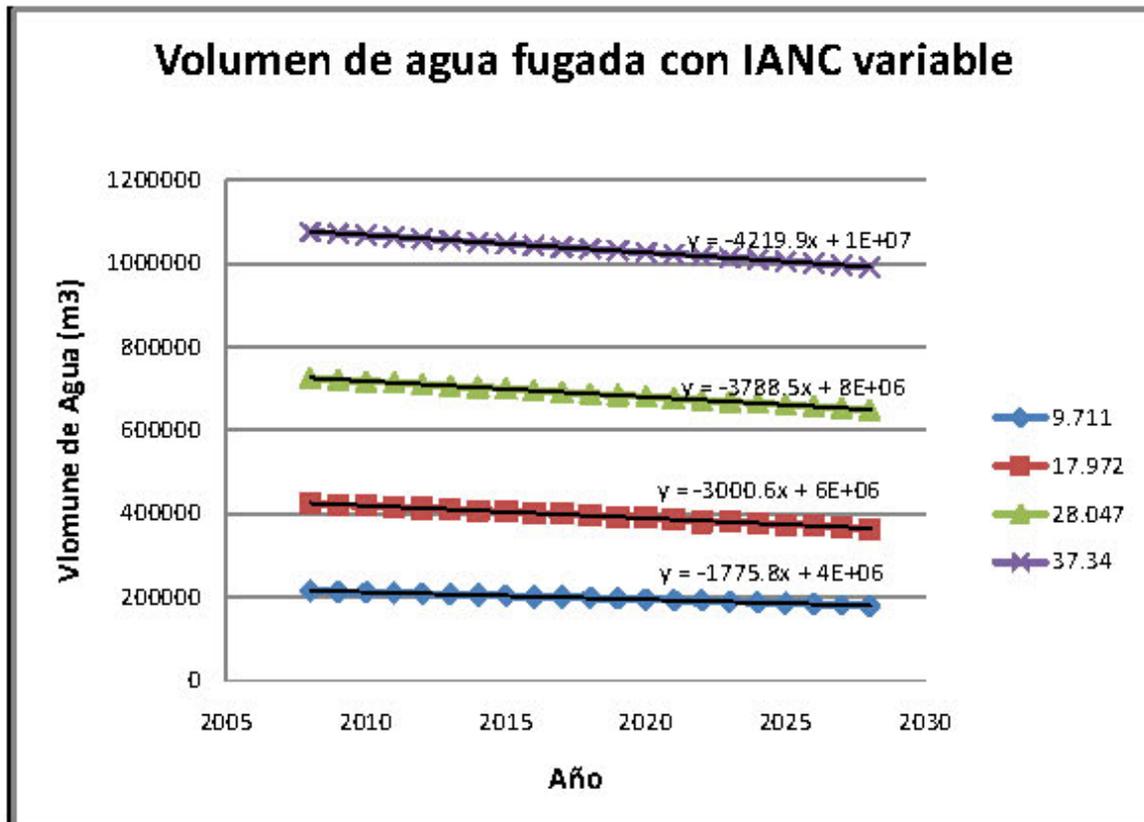


Gráfico 4.9. Volumen de agua fugada Sector 35 en PVC con IANC variable

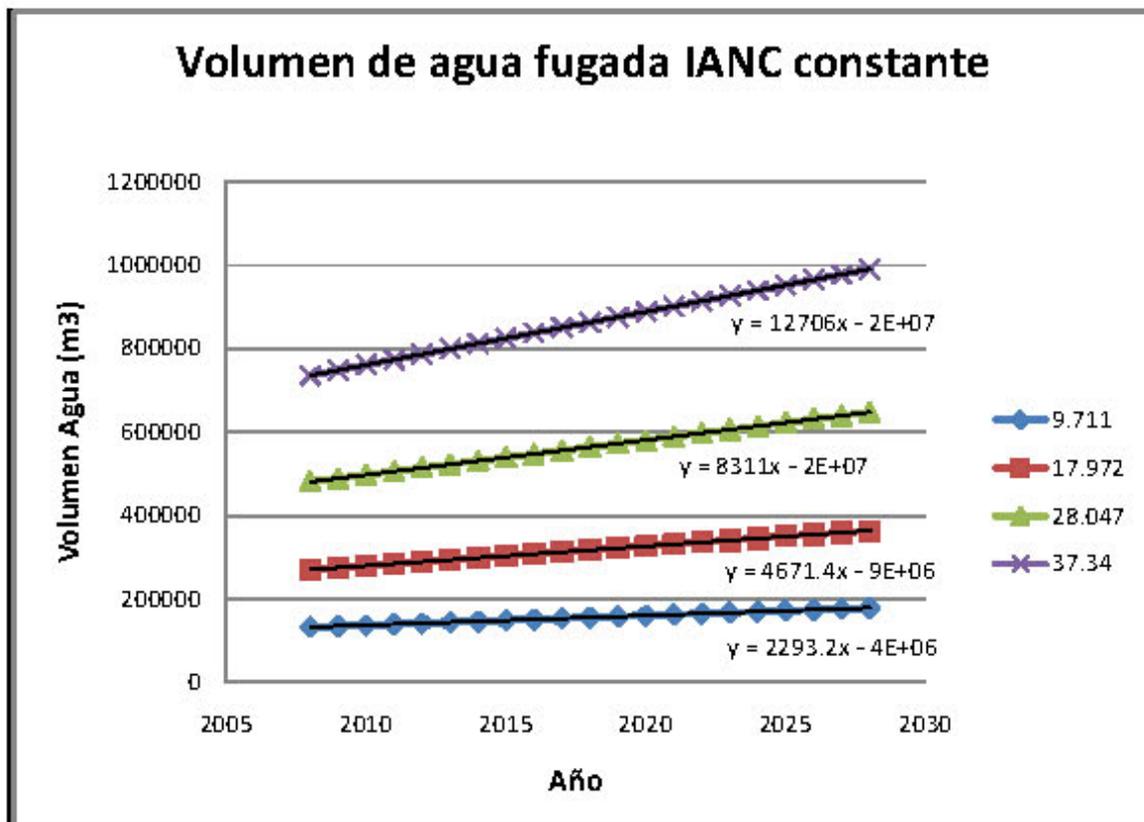


Gráfico 4.10. Volumen de agua fugada Sector 35 en PVC con IANC constante

4.1.4 Candelaria

Para esta red, se ilustrarán solamente los resultados de la modelación hidráulica más relevantes para el análisis que concierne el presente.

Se ilustran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	9.465	18.854	28.813	37.467
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s ² m ^{1/2})	0.0017	0.0038	0.0065	0.0095

Tabla 4.21 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Candelaria en PVC

Luego, de manera gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

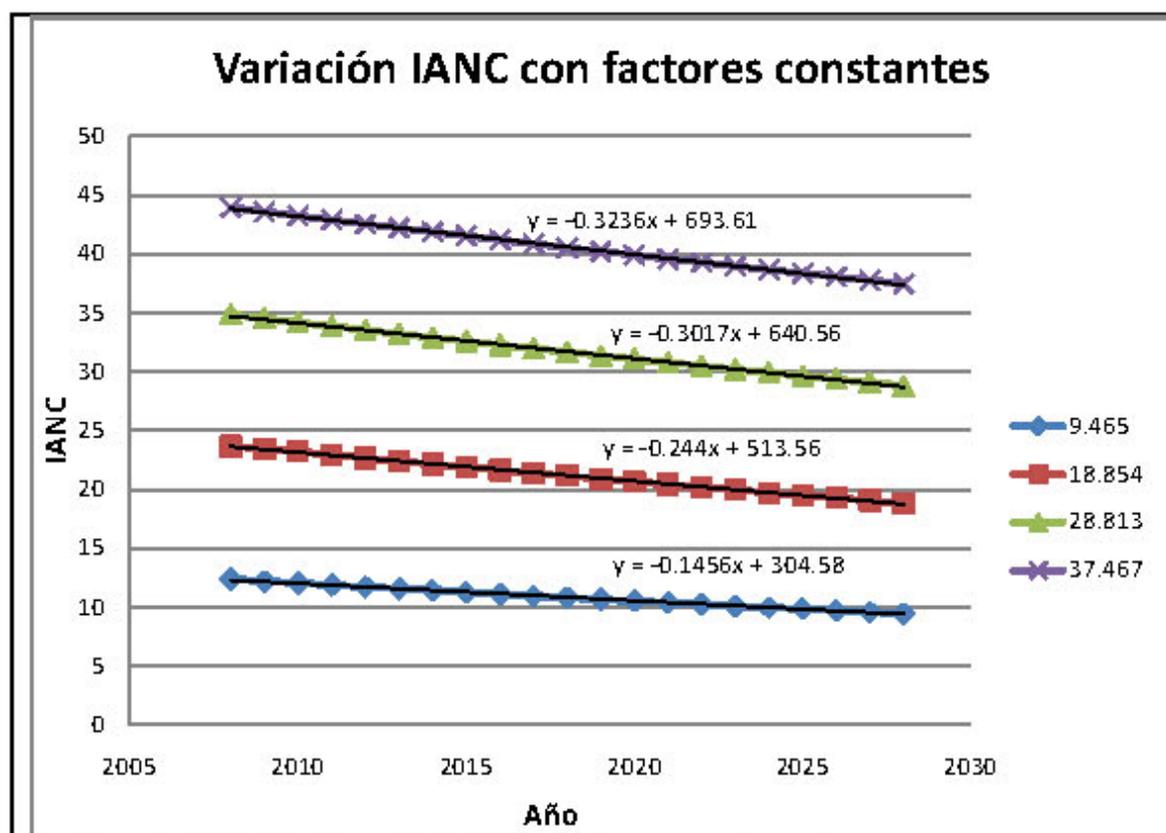


Gráfico 4.11 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Candelaria en PVC.

Luego de tener el comportamiento del IANC en el tiempo se procede a calcular el volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1. Gráficamente se tiene:

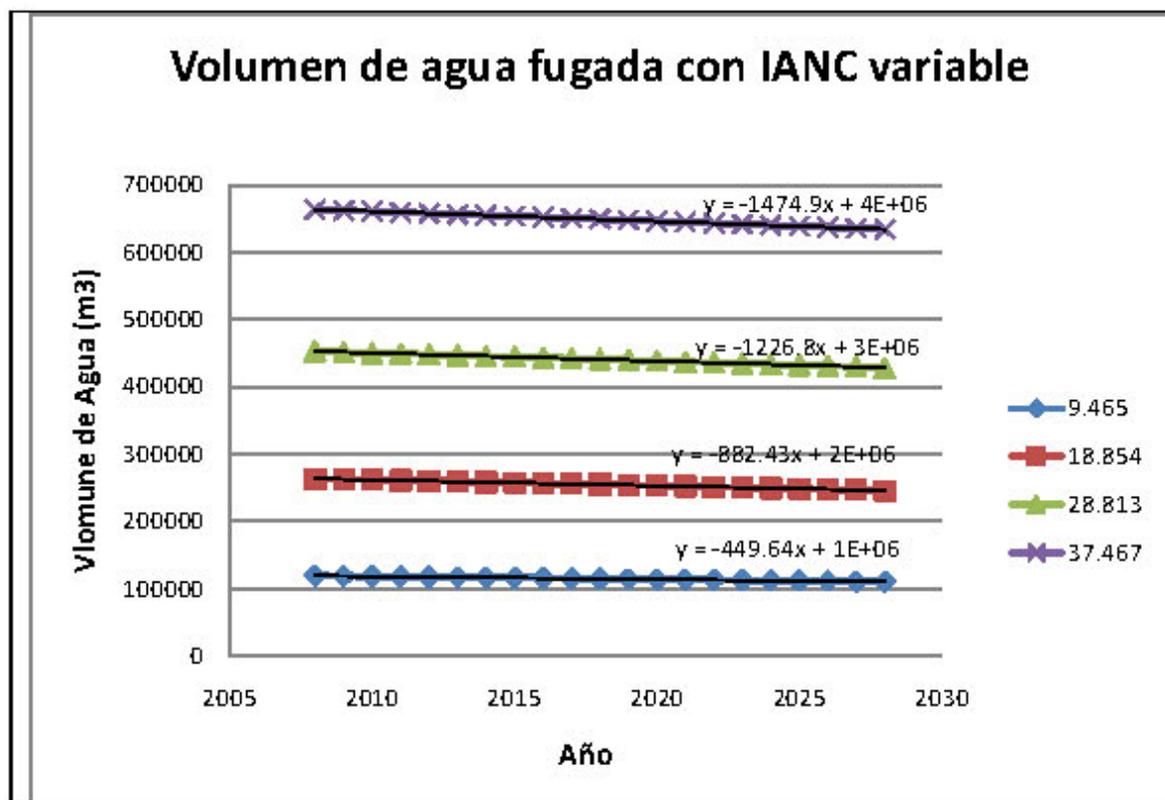


Gráfico 4.12. Volumen de agua fugada Candelaria en PVC con IANC variable

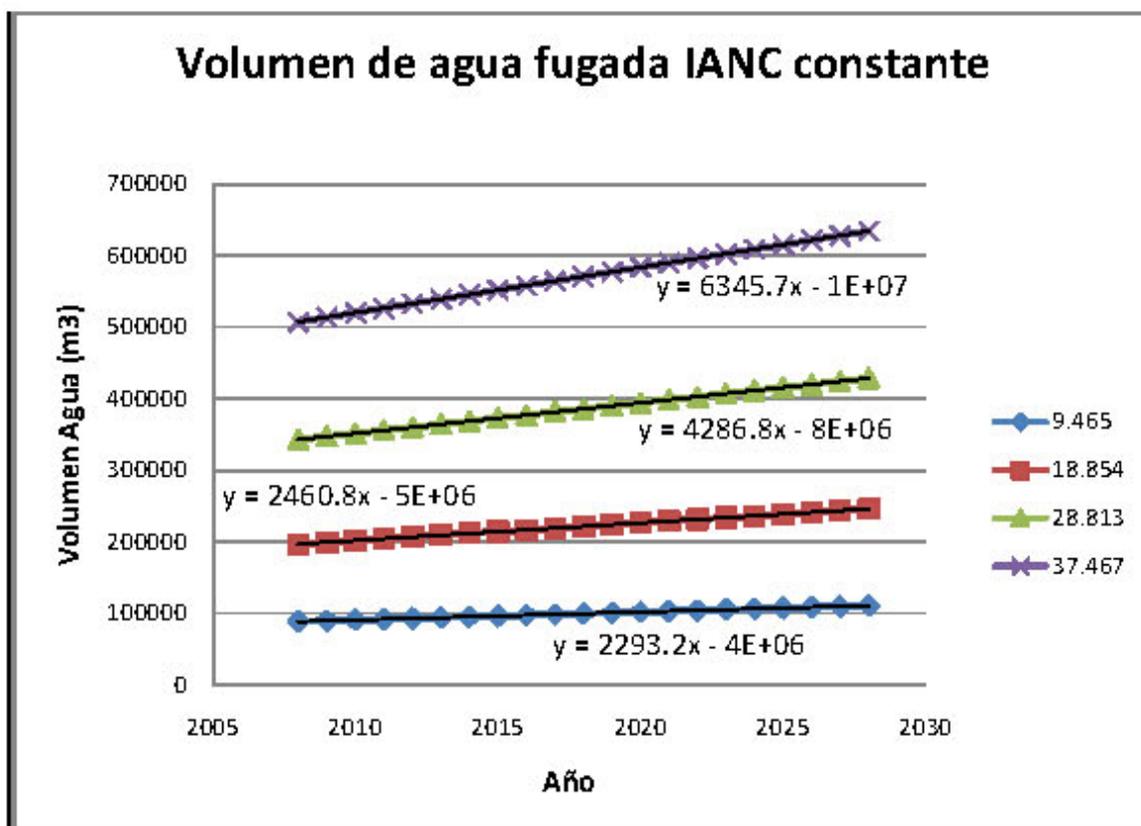


Gráfico 4.13. Volumen de agua fugada Candelaria en PVC con IANC constante

4.1.5 La Cumbre

Para esta red, se ilustrarán solamente los resultados de la modelación hidráulica más relevantes para el análisis que concierne el presente.

Se ilustran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	7.153	17.406	27.445	36.194
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0002	0.00055	0.001	0.0015

Tabla 4.22 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños La Cumbre en PVC

Luego, de manera gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

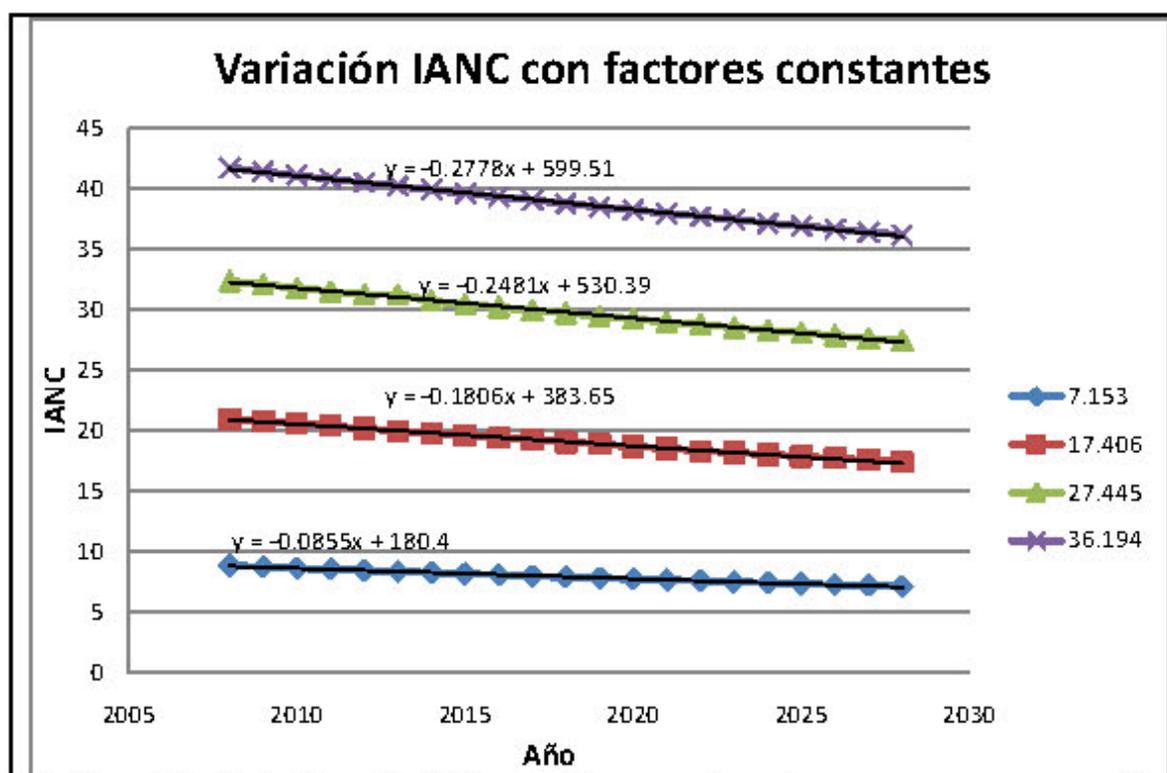


Gráfico 4.14 Variación del IANC con factores de emisores constantes para La Cumbre en PVC.

Luego de tener el comportamiento del IANC en el tiempo se procede a calcular el volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1. Gráficamente se tiene:

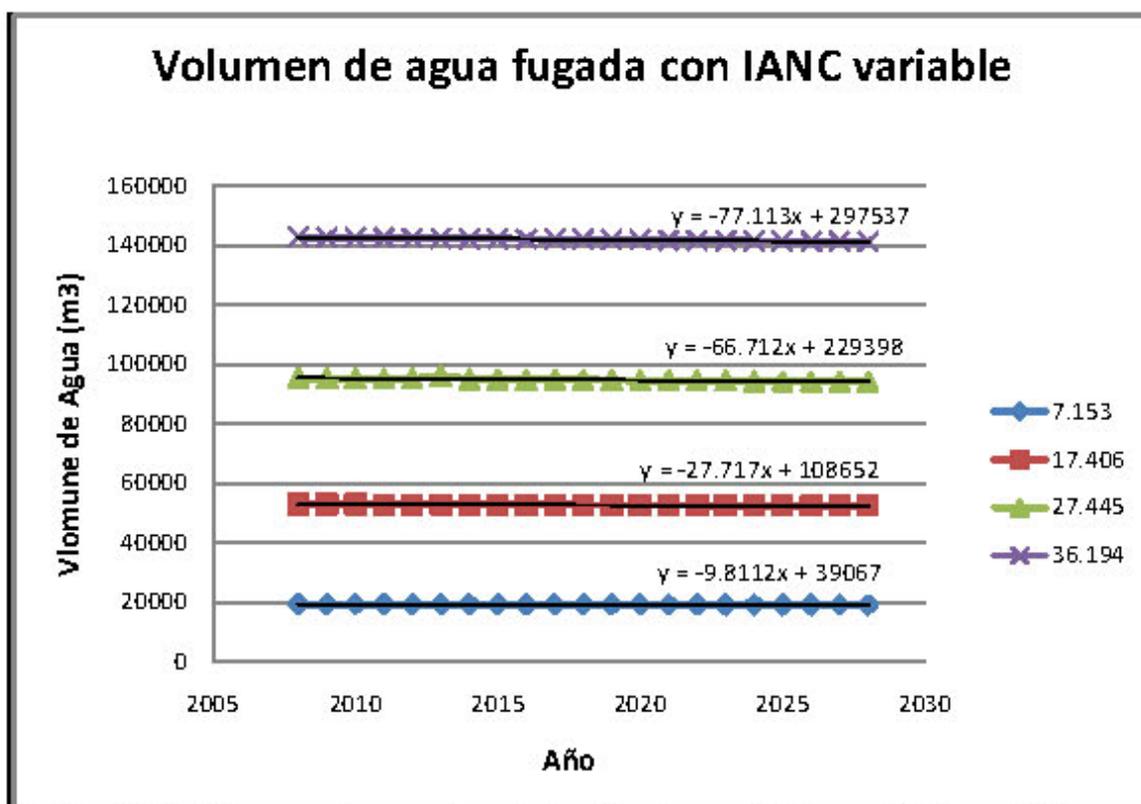


Gráfico 4.15. Volumen de agua fugada La Cumbre en PVC con IANC variable

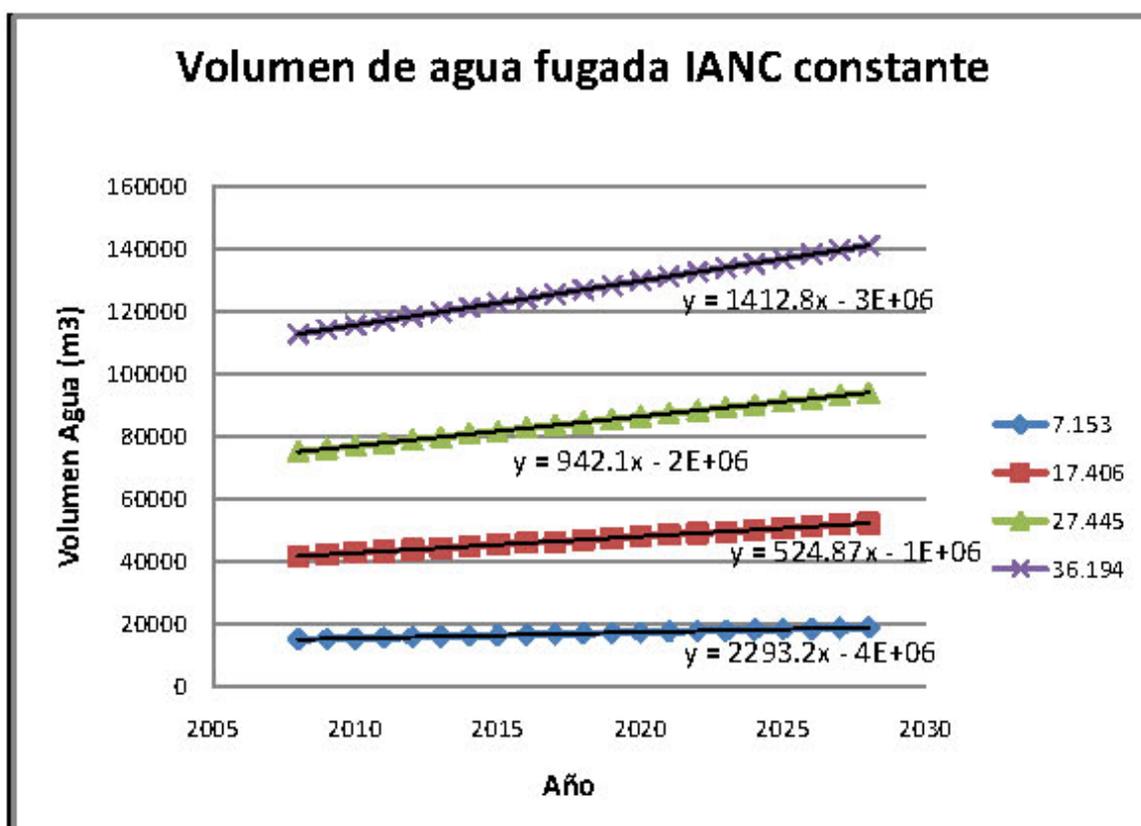


Gráfico 4.16. Volumen de agua fugada La Cumbre en PVC con IANC constante

4.2 Para Hierro Dúctil

El hierro dúctil es, además del PVC, otro de los materiales más utilizados para la construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable en el país (Colombia); su rugosidad absoluta es de 0.25 mm (varias veces la del PVC que es de 0.0015 mm), razón por la cual es de esperarse que tubos que conforman el sistema (red) tengan un mayor diámetro al utilizar este material que el que se necesita al construir con PVC.

4.2.1 R28

Dado que en la sección 4.1.1 se realizó el procedimiento completo de diseño a manera de ejemplo, en este caso se ilustrarán únicamente los resultados más relevantes de la modelación hidráulica de la red.

Primero se muestran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	8.972	18.816	28.879	38.46
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0433	0.1	0.175	0.2725

Tabla 4.23 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños R28 en Hierro Dúctil

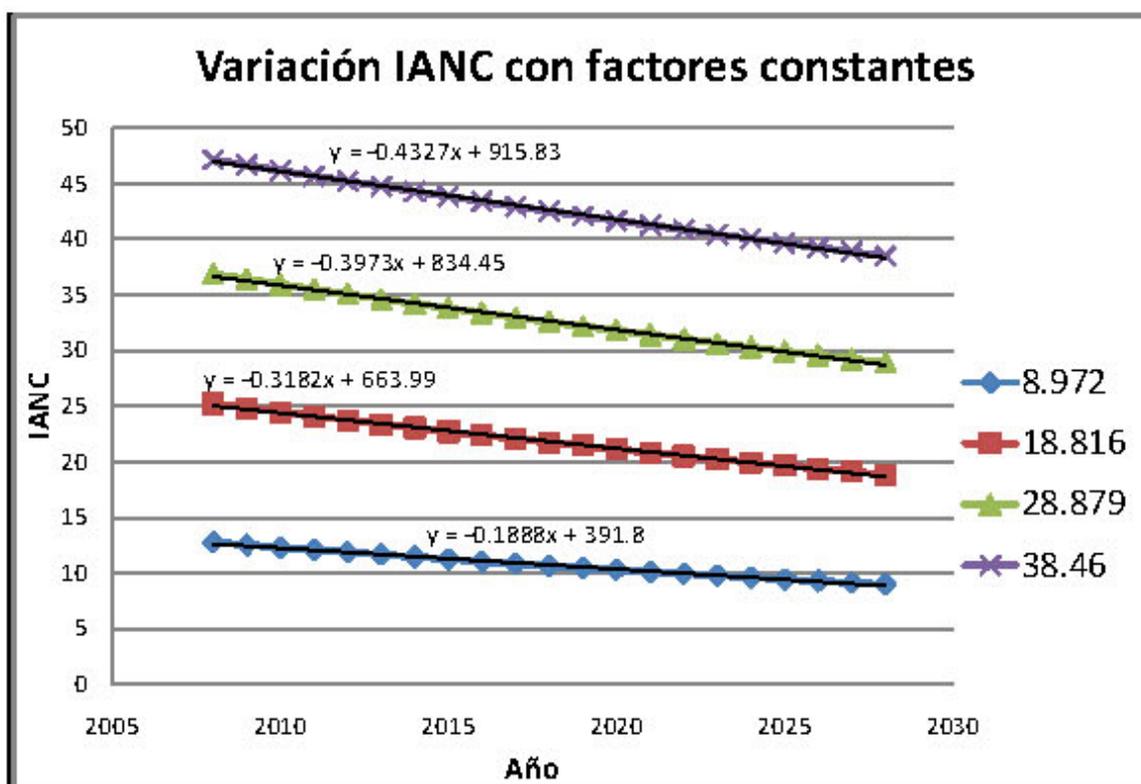


Gráfico 4.17 Variación del IANC con factores de emisores constantes para R28 en Hierro Dúctil.

En la anterior gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

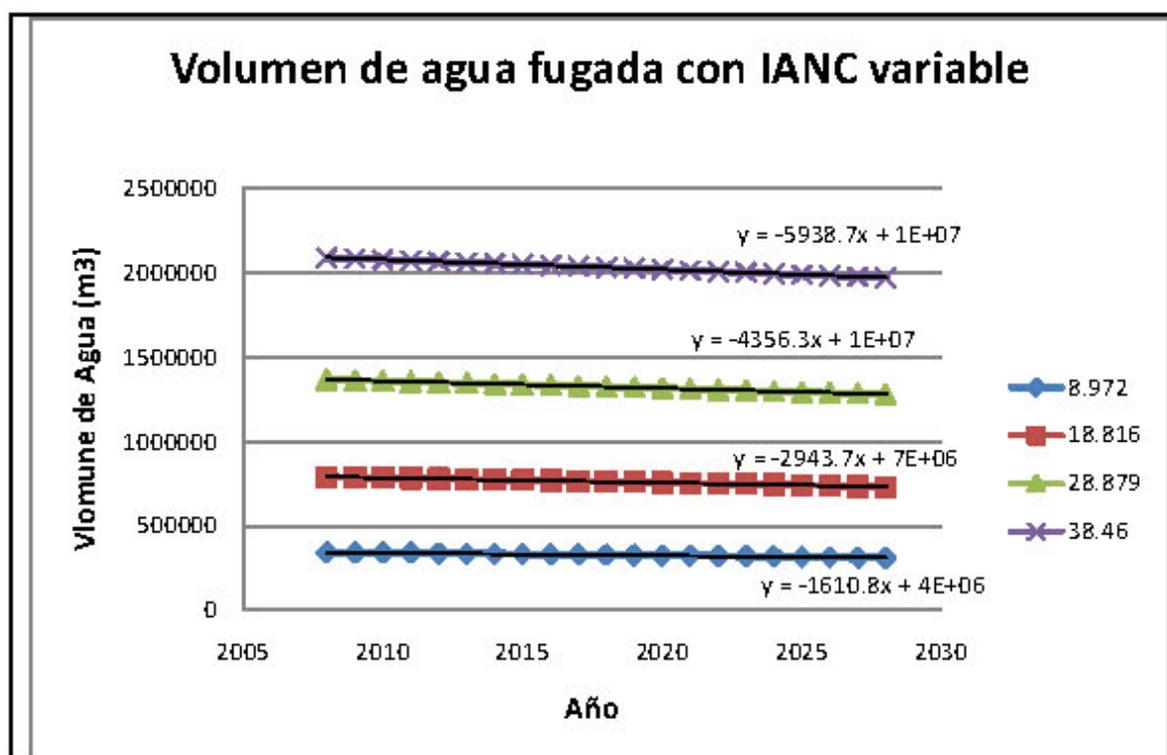


Gráfico 4.18. Volumen de agua fugada R28 en Hierro Dúctil con IANC variable

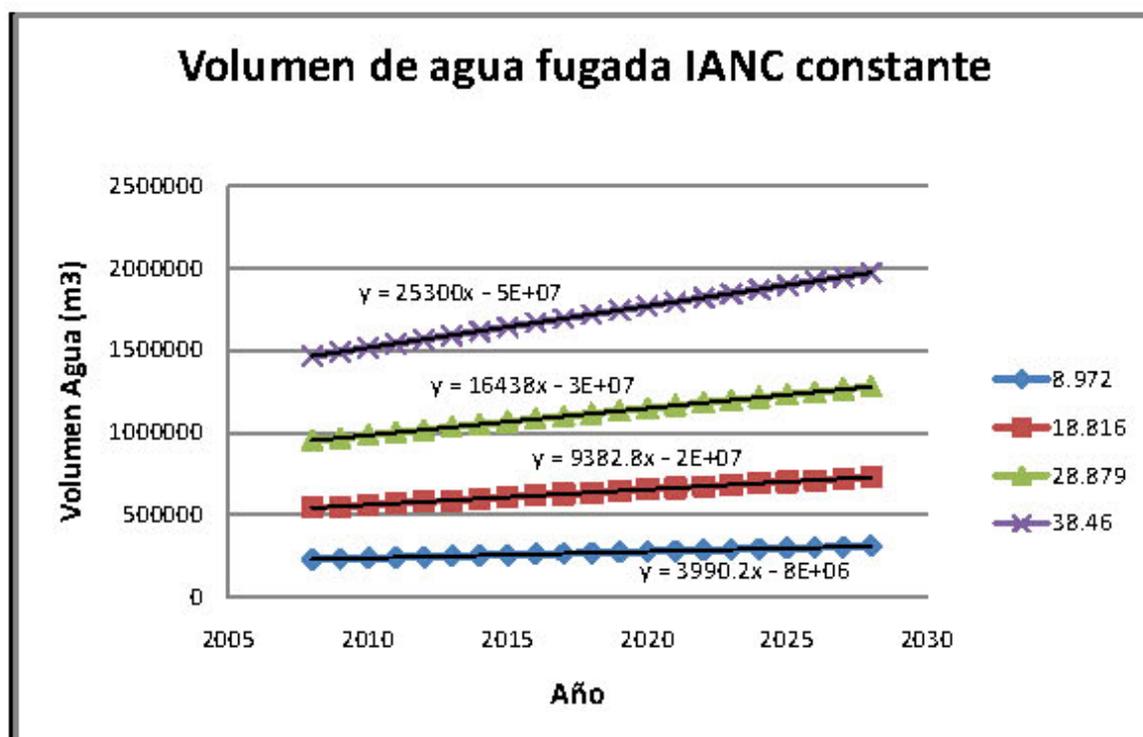


Gráfico 4.19. Volumen de agua fugada R28 en Hierro Dúctil con IANC constante

El Gráfico 4.18 y el Gráfico 4.19 se ilustran los resultados del cálculo del volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1 después de tener el comportamiento del IANC variable en el tiempo.

4.2.2 Andalucía Alta

En este caso se ilustrarán únicamente los resultados más relevantes de la modelación hidráulica de la red.

Primero se muestran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	8.972	18.816	28.879	38.46
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0012	0.0028	0.0045	0.00725

Tabla 4.24 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Andalucía Alta en Hierro Dúctil

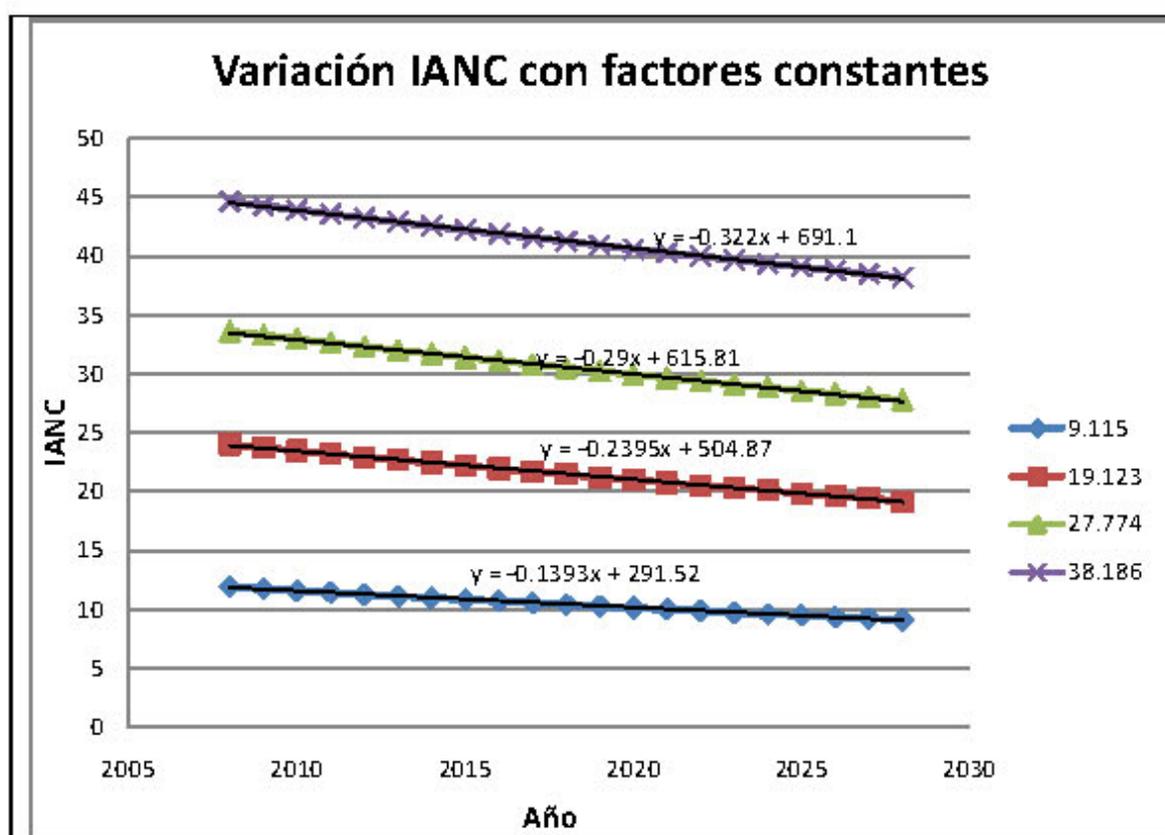


Gráfico 4.20 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Andalucía Alta en Hierro Dúctil.

En la anterior gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

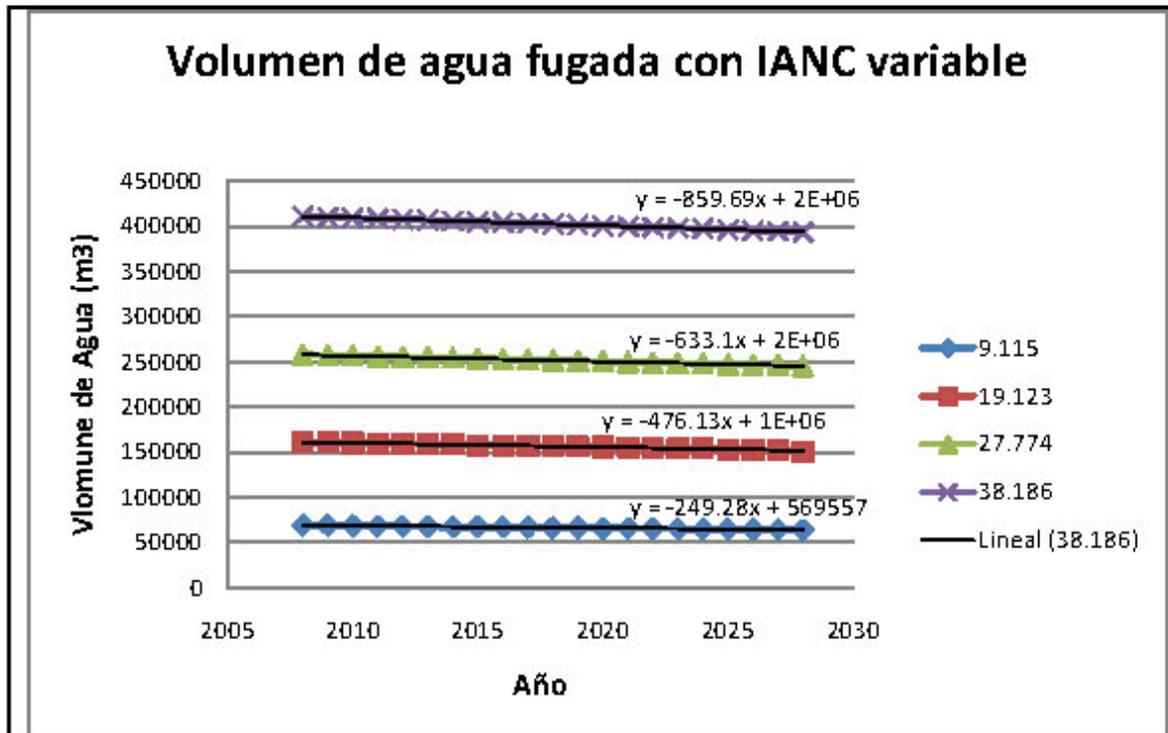


Gráfico 4.21. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en Hierro Dúctil con IANC variable

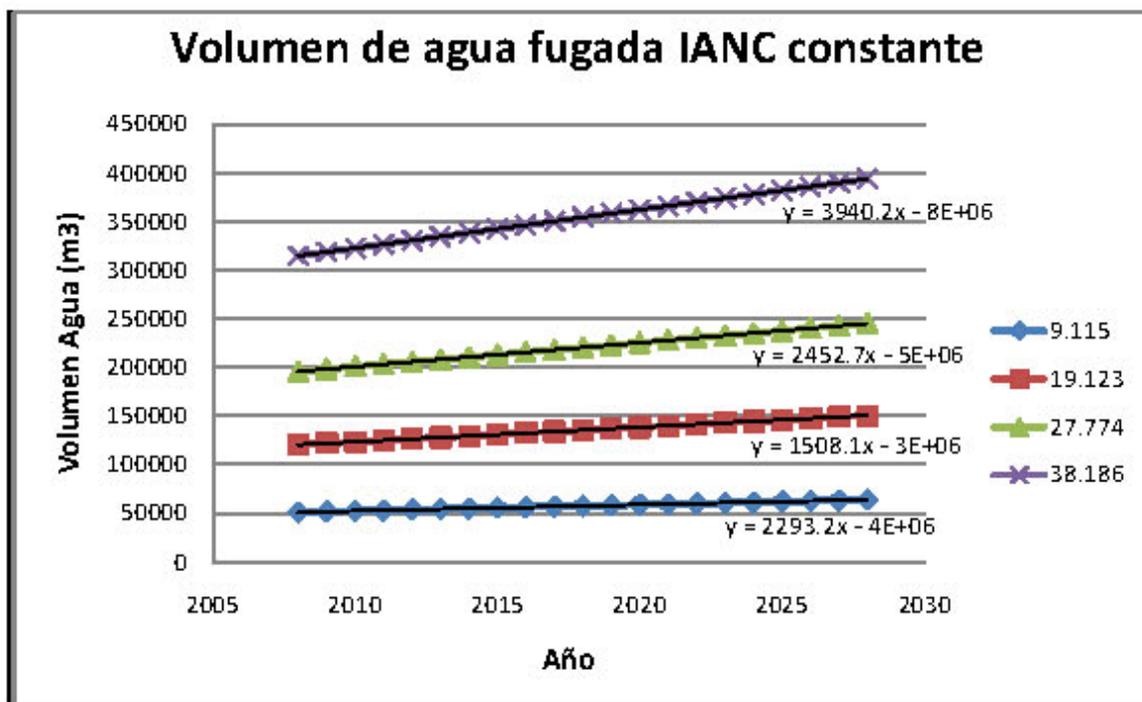


Gráfico 4.22. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en Hierro Dúctil con IANC constante

El Gráfico 4.21 y el Gráfico 4.22 ilustra los resultados del cálculo del volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1 después de tener el comportamiento del IANC variable en el tiempo.

4.2.3 Sector 35 Bogotá

En este caso se ilustrarán únicamente los resultados más relevantes de la modelación hidráulica de la red.

Primero se muestran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	8.12	17.345	36.465	36.739
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0008	0.0018	0.003	0.0049

Tabla 4.25 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Sector 35 en Hierro Dúctil

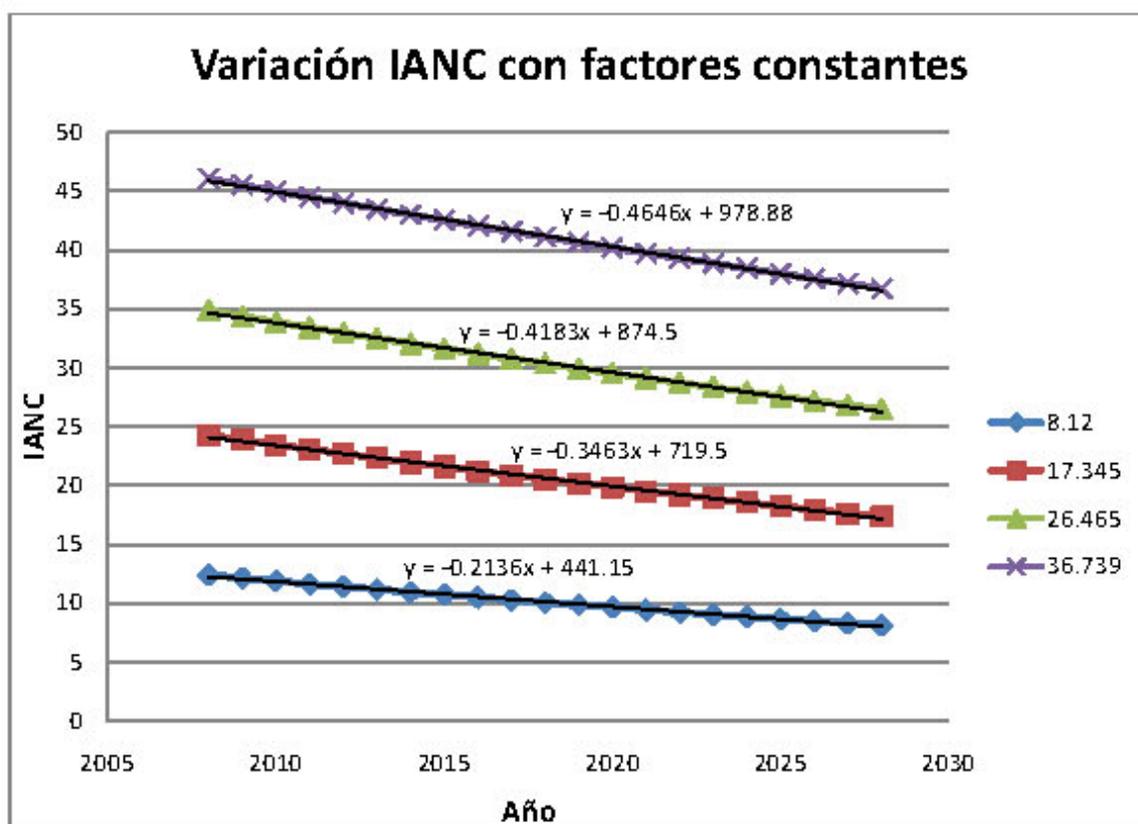


Gráfico 4.23 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Sector 35 en Hierro Dúctil.

En la anterior gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

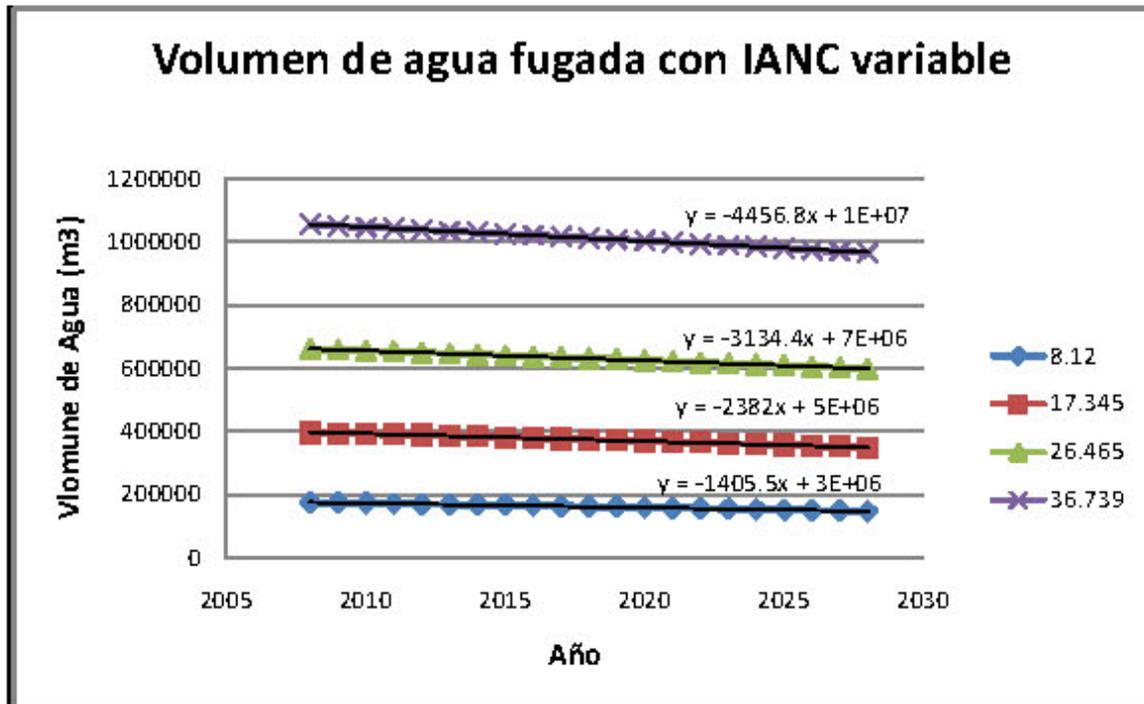


Gráfico 4.24. Volumen de agua fugada Sector 35 en Hierro Dúctil con IANC variable

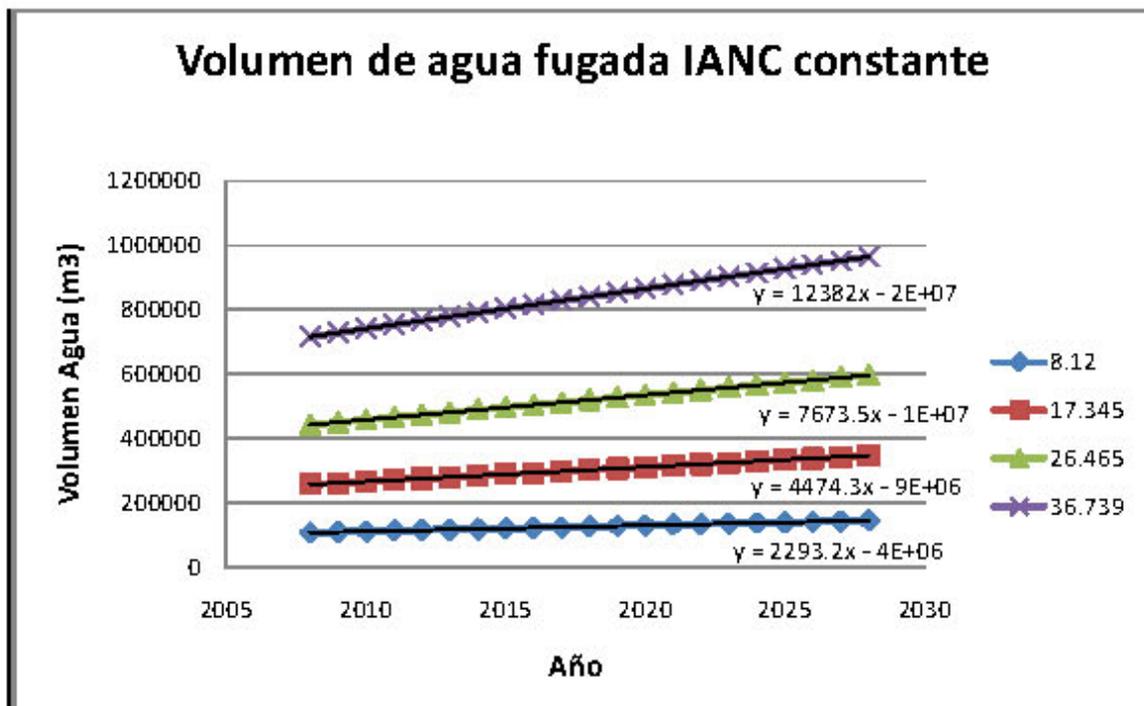


Gráfico 4.25. Volumen de agua fugada Sector 35 en Hierro Dúctil con IANC constante

El Gráfico 4.24 y el Gráfico 4.25 ilustran los resultados del cálculo del volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1 después de tener el comportamiento del IANC variable en el tiempo.

4.2.4 Candelaria

En este caso se ilustrarán únicamente los resultados más relevantes de la modelación hidráulica de la red.

Primero se muestran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	9.017	18.607	27.851	36.089
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.0015	0.0036	0.0061	0.0095

Tabla 4.26 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Candelaria en Hierro Dúctil

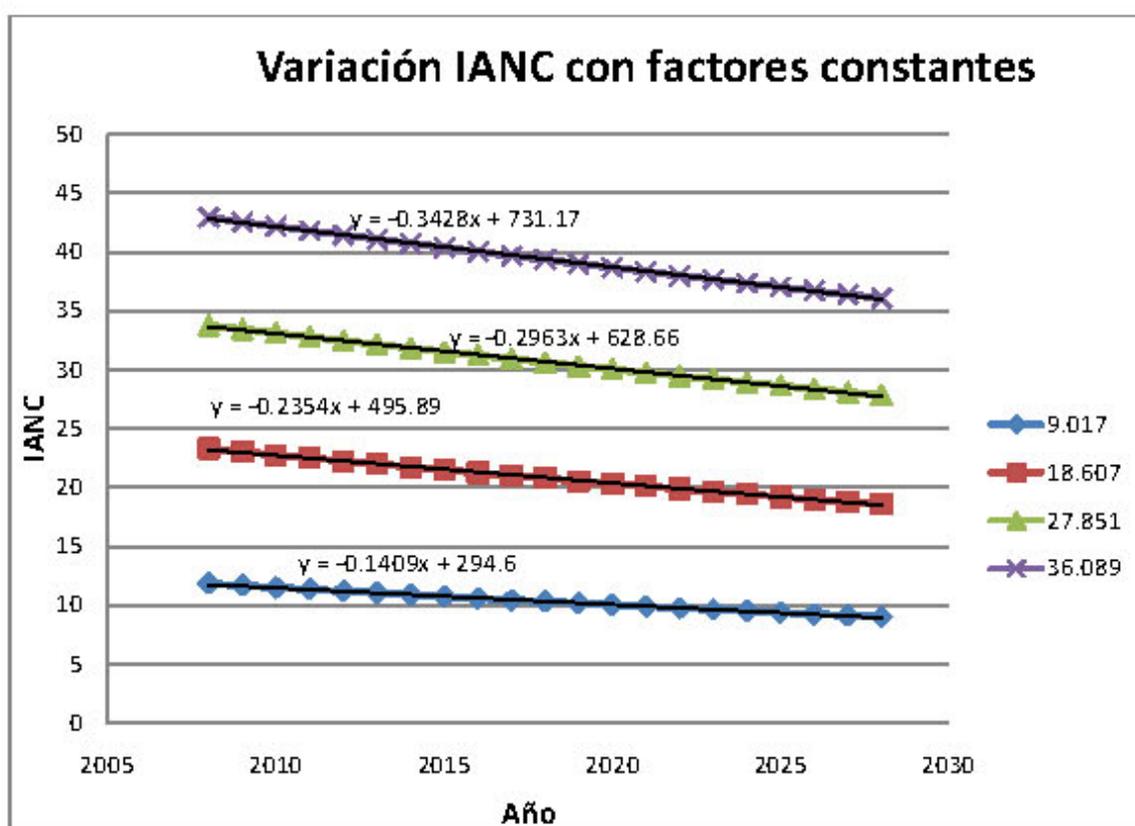


Gráfico 4.26 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Candelaria en Hierro Dúctil.

En la anterior gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

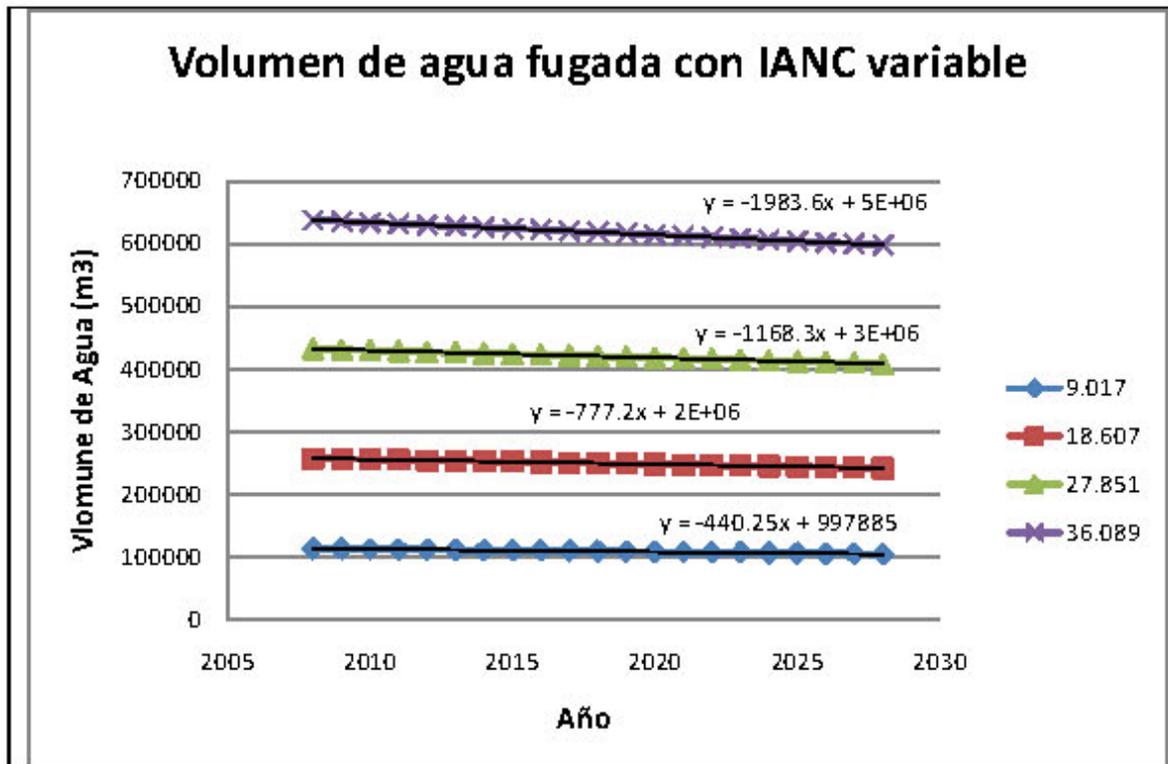


Gráfico 4.27. Volumen de agua fugada Candelaria en Hierro Dúctil con IANC variable

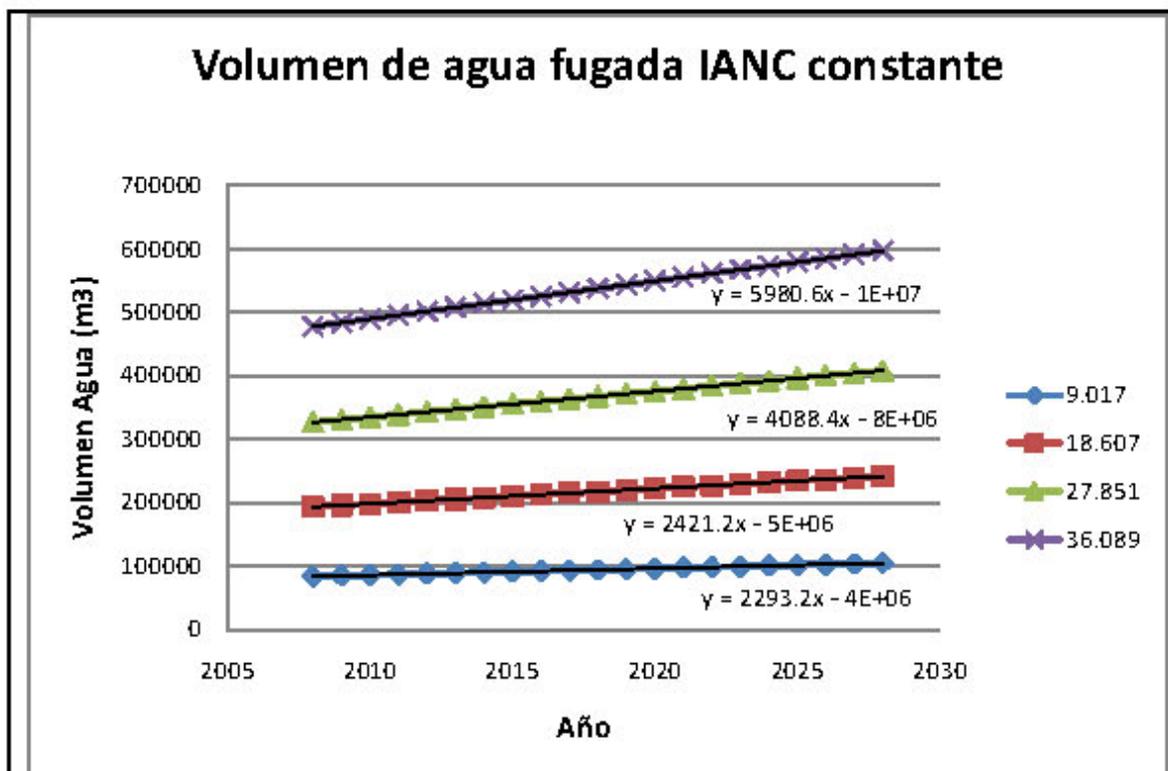


Gráfico 4.28. Volumen de agua fugada Candelaria en Hierro Dúctil con IANC constante

Los gráficos anteriores ilustran los resultados del cálculo del volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1 después de tener el comportamiento del IANC variable en el tiempo.

4.2.5 La Cumbre

En este caso se ilustrarán únicamente los resultados más relevantes de la modelación hidráulica de la red.

Primero se muestran los valores de los exponentes y los coeficientes de los emisores utilizados en todos los nodos en cada una de las modelaciones.

IANC (%)	9.017	18.607	27.851	36.089
Exponente Emisor	0.5	0.5	0.5	0.5
Coefficiente Emisor (l/s*m ^(1/2))	0.00025	0.0006	0.001	0.0016

Tabla 4.27 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños La cumbre en Hierro Dúctil

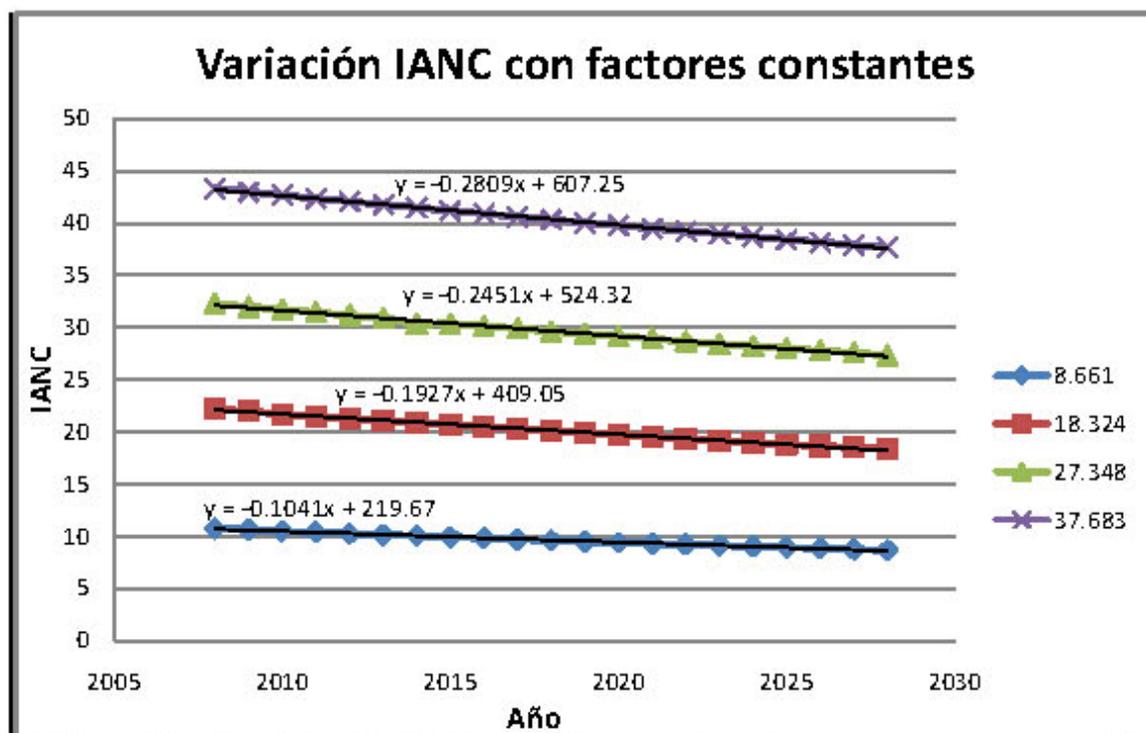


Gráfico 4.29 Variación del IANC con factores de emisores constantes para La cumbre en Hierro Dúctil.

En la anterior gráfica se muestra el comportamiento del IANC en el tiempo acorde con las variaciones en las demandas para esta red y manteniendo constantes los coeficientes y exponentes de los emisores en el tiempo.

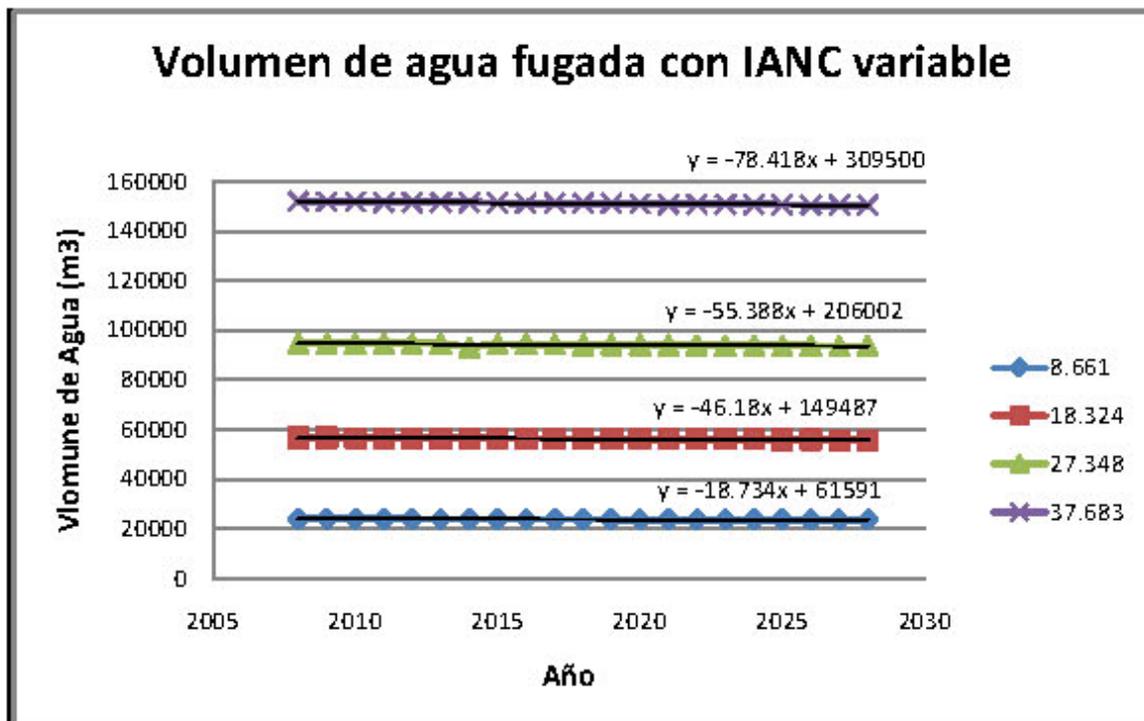


Gráfico 4.30. Volumen de agua fugada La cumbre en Hierro Dúctil con IANC variable

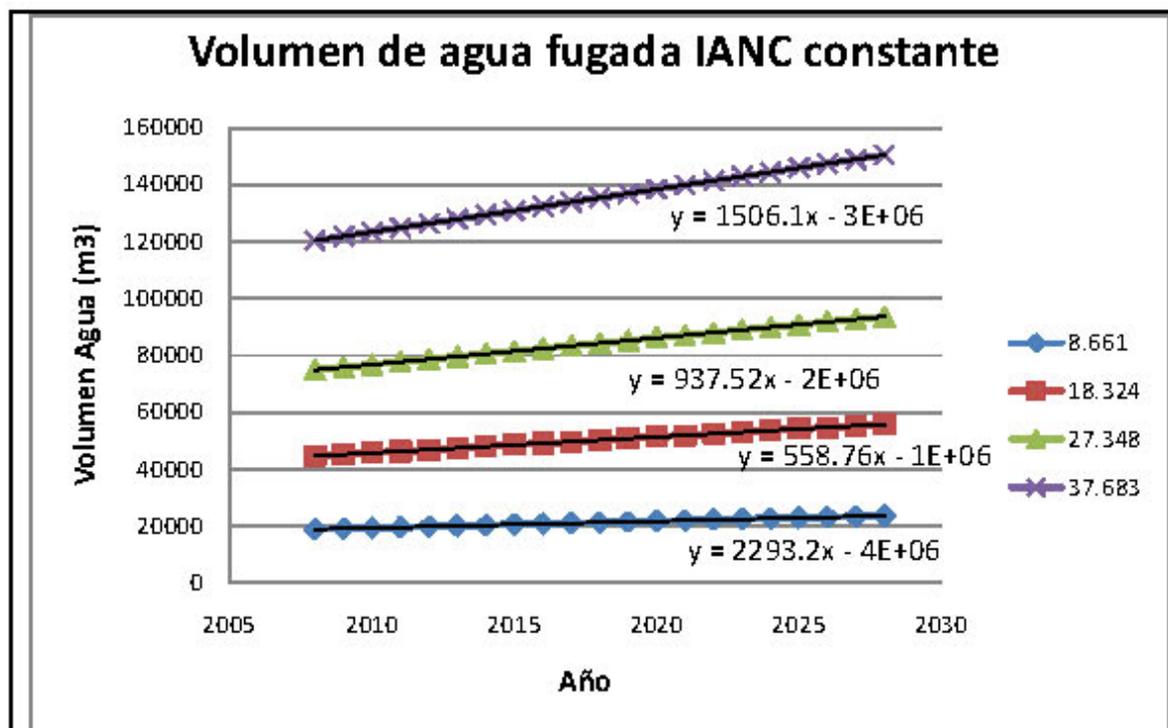


Gráfico 4.31. Volumen de agua fugada La cumbre en Hierro Dúctil con IANC constante

Los gráficos anteriores ilustran los resultados del cálculo del volumen de agua fugada acorde con las dos suposiciones de fuga ilustradas en la sección 3.2.2.1 después de tener el comportamiento del IANC variable en el tiempo.

5 DESARROLLO Y RESULTADOS DE ANÁLISIS ECONÓMICO

Al igual que en la sección 4, se realizará toda la metodología para la red R28 en PVC a manera de ejemplo, mientras que para las demás, se ilustrarán únicamente los resultados y no el procedimiento completo.

5.1 En PVC

5.1.1 R28

5.1.1.1 Costo de tuberías utilizadas para la construcción de la red

A partir de los dimensionamientos mostrados entre la Tabla 4.10 y la Tabla 4.14 y con la función de costo mostrada en la Ecuación 3.3 se establecen los siguientes resultados para el costo de solo las tuberías para cada uno de los IANC supuestos.

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
1	50	80	\$ 496 916	23	75	150	\$ 1 996 806
2	75	150	\$ 1 996 806	24	50	80	\$ 496 916
3	150	100	\$ 4 899 831	25	75	200	\$ 2 662 408
4	150	120	\$ 5 879 797	26	50	120	\$ 745 374
5	200	100	\$ 8 415 228	27	75	100	\$ 1 331 204
6	50	120	\$ 745 374	28	50	150	\$ 931 718
7	50	100	\$ 621 145	29	50	80	\$ 496 916
8	50	150	\$ 931 718	30	50	180	\$ 1 118 061
9	50	80	\$ 496 916	31	50	120	\$ 745 374
10	200	200	\$ 16 830 456	32	75	100	\$ 1 331 204
11	75	120	\$ 1 597 445	33	50	150	\$ 931 718
12	75	100	\$ 1 331 204	34	50	80	\$ 496 916
13	50	150	\$ 931 718	35	50	150	\$ 931 718
14	50	80	\$ 496 916	36	50	120	\$ 745 374
15	200	180	\$ 15 147 410	37	50	100	\$ 621 145
16	75	120	\$ 1 597 445	38	50	150	\$ 931 718
17	50	100	\$ 621 145	39	50	80	\$ 496 916
18	50	150	\$ 931 718	40	50	150	\$ 931 718
19	50	80	\$ 496 916	41	50	200	\$ 1 242 290
20	200	220	\$ 18 513 502	42	50	220	\$ 1 366 519
21	150	120	\$ 5 879 797	43	50	180	\$ 1 118 061
22	100	100	\$ 2 286 280	44	50	100	\$ 621 145

Tabla 5.1. Costos R28 en PVC IANC=0

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
45	50	200	\$ 1 242 290	58	50	180	\$ 1 118 061
46	50	180	\$ 1 118 061	59	50	200	\$ 1 242 290
47	50	100	\$ 621 145	60	50	220	\$ 1 366 519
48	50	150	\$ 931 718	61	50	100	\$ 621 145
49	50	200	\$ 1 242 290	62	50	150	\$ 931 718
50	50	180	\$ 1 118 061	63	50	200	\$ 1 242 290
51	50	180	\$ 1 118 061	64	100	180	\$ 4 115 305
52	50	200	\$ 1 242 290	65	50	180	\$ 1 118 061
53	50	220	\$ 1 366 519	66	100	200	\$ 4 572 561
54	75	100	\$ 1 331 204	67	50	220	\$ 1 366 519
55	50	150	\$ 931 718	69	250	29.589	\$ 3 787 800
56	50	200	\$ 1 242 290	TOTAL			\$ 149 542 885
57	50	180	\$ 1 118 061				

Tabla 5.2. Costos R28 en PVC IANC=0 (continuación)

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
1	50	80	\$ 496 916	30	75	180	\$ 2 396 168
2	75	150	\$ 1 996 806	31	50	120	\$ 745 374
3	100	100	\$ 2 286 280	32	50	100	\$ 621 145
4	100	120	\$ 2 743 536	33	50	150	\$ 931 718
5	250	100	\$ 12 801 378	34	50	80	\$ 496 916
6	100	120	\$ 2 743 536	35	50	150	\$ 931 718
7	100	100	\$ 2 286 280	36	50	120	\$ 745 374
8	75	150	\$ 1 996 806	37	50	100	\$ 621 145
9	50	80	\$ 496 916	38	50	150	\$ 931 718
10	200	200	\$ 16 830 456	39	50	80	\$ 496 916
11	100	120	\$ 2 743 536	40	50	150	\$ 931 718
12	100	100	\$ 2 286 280	41	50	200	\$ 1 242 290
13	75	150	\$ 1 996 806	42	50	220	\$ 1 366 519
14	50	80	\$ 496 916	43	50	180	\$ 1 118 061
15	200	180	\$ 15 147 410	44	50	100	\$ 621 145
16	75	120	\$ 1 597 445	45	50	200	\$ 1 242 290
17	75	100	\$ 1 331 204	46	50	180	\$ 1 118 061
18	50	150	\$ 931 718	47	50	100	\$ 621 145
19	50	80	\$ 496 916	48	50	150	\$ 931 718
20	200	220	\$ 18 513 502	49	75	200	\$ 2 662 408
21	150	120	\$ 5 879 797	50	50	180	\$ 1 118 061
22	100	100	\$ 2 286 280	51	75	180	\$ 2 396 168
23	75	150	\$ 1 996 806	52	50	200	\$ 1 242 290
24	50	80	\$ 496 916	53	50	220	\$ 1 366 519
25	100	200	\$ 4 572 561	54	75	100	\$ 1 331 204
26	50	120	\$ 745 374	55	50	150	\$ 931 718
27	75	100	\$ 1 331 204	56	75	200	\$ 2 662 408
28	50	150	\$ 931 718	57	50	180	\$ 1 118 061
29	50	80	\$ 496 916	58	75	180	\$ 2 396 168

Tabla 5.3. Costos R28 en PVC IANC=10.074

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
59	75	200	\$ 2 662 408	65	50	180	\$ 1 118 061
60	50	220	\$ 1 366 519	66	100	200	\$ 4 572 561
61	50	100	\$ 621 145	67	50	220	\$ 1 366 519
62	50	150	\$ 931 718	69	250	29.589	\$ 3 787 800
63	50	200	\$ 1 242 290	TOTAL			\$ 164 359 555
64	75	180	\$ 2 396 168				

Tabla 5.4. Costos R28 en PVC IANC=10.074 (continuación)

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
1	50	80	\$ 496 916	36	50	120	\$ 745 374
2	100	150	\$ 3 429 421	37	50	100	\$ 621 145
3	100	100	\$ 2 286 280	38	50	150	\$ 931 718
4	150	120	\$ 5 879 797	39	50	80	\$ 496 916
5	250	100	\$ 12 801 378	40	50	150	\$ 931 718
6	100	120	\$ 2 743 536	41	50	200	\$ 1 242 290
7	75	100	\$ 1 331 204	42	50	220	\$ 1 366 519
8	50	150	\$ 931 718	43	50	180	\$ 1 118 061
9	50	80	\$ 496 916	44	50	100	\$ 621 145
10	200	200	\$ 16 830 456	45	50	200	\$ 1 242 290
11	100	120	\$ 2 743 536	46	50	180	\$ 1 118 061
12	75	100	\$ 1 331 204	47	50	100	\$ 621 145
13	50	150	\$ 931 718	48	50	150	\$ 931 718
14	50	80	\$ 496 916	49	50	200	\$ 1 242 290
15	200	180	\$ 15 147 410	50	50	180	\$ 1 118 061
16	100	120	\$ 2 743 536	51	50	180	\$ 1 118 061
17	75	100	\$ 1 331 204	52	50	200	\$ 1 242 290
18	75	150	\$ 1 996 806	53	50	220	\$ 1 366 519
19	50	80	\$ 496 916	54	75	100	\$ 1 331 204
20	200	220	\$ 18 513 502	55	50	150	\$ 931 718
21	200	120	\$ 10 098 274	56	50	200	\$ 1 242 290
22	100	100	\$ 2 286 280	57	75	180	\$ 2 396 168
23	75	150	\$ 1 996 806	58	50	180	\$ 1 118 061
24	50	80	\$ 496 916	59	50	200	\$ 1 242 290
25	75	200	\$ 2 662 408	60	50	220	\$ 1 366 519
26	50	120	\$ 745 374	61	50	100	\$ 621 145
27	75	100	\$ 1 331 204	62	50	150	\$ 931 718
28	50	150	\$ 931 718	63	50	200	\$ 1 242 290
29	50	80	\$ 496 916	64	100	180	\$ 4 115 305
30	50	180	\$ 1 118 061	65	50	180	\$ 1 118 061
31	50	120	\$ 745 374	66	150	200	\$ 9 799 661
32	75	100	\$ 1 331 204	67	50	220	\$ 1 366 519
33	50	150	\$ 931 718	69	250	29.589	\$ 3 787 800
34	50	80	\$ 496 916	TOTAL			\$ 170 247 334
35	50	150	\$ 931 718				

Tabla 5.5. Costos R28 en PVC IANC=18.021

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
1	75	80	\$ 1 064 963	36	75	120	\$ 1 597 445
2	75	150	\$ 1 996 806	37	75	100	\$ 1 331 204
3	75	100	\$ 1 331 204	38	75	150	\$ 1 996 806
4	75	120	\$ 1 597 445	39	75	80	\$ 1 064 963
5	250	100	\$ 12 801 378	40	75	150	\$ 1 996 806
6	75	120	\$ 1 597 445	41	75	200	\$ 2 662 408
7	75	100	\$ 1 331 204	42	75	220	\$ 2 928 649
8	75	150	\$ 1 996 806	43	75	180	\$ 2 396 168
9	75	80	\$ 1 064 963	44	75	100	\$ 1 331 204
10	250	200	\$ 25 602 755	45	50	200	\$ 1 242 290
11	75	120	\$ 1 597 445	46	75	180	\$ 2 396 168
12	75	100	\$ 1 331 204	47	75	100	\$ 1 331 204
13	75	150	\$ 1 996 806	48	50	150	\$ 931 718
14	50	80	\$ 496 916	49	50	200	\$ 1 242 290
15	200	180	\$ 15 147 410	50	75	180	\$ 2 396 168
16	75	120	\$ 1 597 445	51	75	180	\$ 2 396 168
17	75	100	\$ 1 331 204	52	75	200	\$ 2 662 408
18	75	150	\$ 1 996 806	53	75	220	\$ 2 928 649
19	50	80	\$ 496 916	54	50	100	\$ 621 145
20	200	220	\$ 18 513 502	55	50	150	\$ 931 718
21	150	120	\$ 5 879 797	56	75	200	\$ 2 662 408
22	75	100	\$ 1 331 204	57	75	180	\$ 2 396 168
23	75	150	\$ 1 996 806	58	75	180	\$ 2 396 168
24	75	80	\$ 1 064 963	59	75	200	\$ 2 662 408
25	75	200	\$ 2 662 408	60	50	220	\$ 1 366 519
26	75	120	\$ 1 597 445	61	75	100	\$ 1 331 204
27	75	100	\$ 1 331 204	62	75	150	\$ 1 996 806
28	75	150	\$ 1 996 806	63	75	200	\$ 2 662 408
29	75	80	\$ 1 064 963	64	75	180	\$ 2 396 168
30	75	180	\$ 2 396 168	65	75	180	\$ 2 396 168
31	75	120	\$ 1 597 445	66	150	200	\$ 9 799 661
32	75	100	\$ 1 331 204	67	75	220	\$ 2 928 649
33	75	150	\$ 1 996 806	69	250	29.589	\$ 3 787 800
34	75	80	\$ 1 064 963	TOTAL			\$ 199 367 731
35	75	150	\$ 1 996 806				

Tabla 5.6. Costos R28 en PVC IANC=27.823

ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)	ID	DIAMETRO	LONGITUD	COSTO (COP)
TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos	TUBO	Milímetros	Metros	Solo Tubos
1	75	80	\$ 1 064 963	36	75	120	\$ 1 597 445
2	75	150	\$ 1 996 806	37	75	100	\$ 1 331 204
3	150	100	\$ 4 899 831	38	75	150	\$ 1 996 806
4	150	120	\$ 5 879 797	39	75	80	\$ 1 064 963
5	250	100	\$ 12 801 378	40	75	150	\$ 1 996 806
6	75	120	\$ 1 597 445	41	75	200	\$ 2 662 408
7	75	100	\$ 1 331 204	42	75	220	\$ 2 928 649
8	75	150	\$ 1 996 806	43	75	180	\$ 2 396 168
9	75	80	\$ 1 064 963	44	75	100	\$ 1 331 204
10	250	200	\$ 25 602 755	45	75	200	\$ 2 662 408
11	75	120	\$ 1 597 445	46	75	180	\$ 2 396 168
12	75	100	\$ 1 331 204	47	75	100	\$ 1 331 204
13	75	150	\$ 1 996 806	48	75	150	\$ 1 996 806
14	75	80	\$ 1 064 963	49	75	200	\$ 2 662 408
15	200	180	\$ 15 147 410	50	75	180	\$ 2 396 168
16	150	120	\$ 5 879 797	51	75	180	\$ 2 396 168
17	75	100	\$ 1 331 204	52	75	200	\$ 2 662 408
18	75	150	\$ 1 996 806	53	75	220	\$ 2 928 649
19	75	80	\$ 1 064 963	54	75	100	\$ 1 331 204
20	200	220	\$ 18 513 502	55	75	150	\$ 1 996 806
21	150	120	\$ 5 879 797	56	75	200	\$ 2 662 408
22	75	100	\$ 1 331 204	57	75	180	\$ 2 396 168
23	75	150	\$ 1 996 806	58	75	180	\$ 2 396 168
24	75	80	\$ 1 064 963	59	75	200	\$ 2 662 408
25	75	200	\$ 2 662 408	60	75	220	\$ 2 928 649
26	75	120	\$ 1 597 445	61	75	100	\$ 1 331 204
27	75	100	\$ 1 331 204	62	75	150	\$ 1 996 806
28	75	150	\$ 1 996 806	63	75	200	\$ 2 662 408
29	75	80	\$ 1 064 963	64	75	180	\$ 2 396 168
30	75	180	\$ 2 396 168	65	75	180	\$ 2 396 168
31	75	120	\$ 1 597 445	66	150	200	\$ 9 799 661
32	75	100	\$ 1 331 204	67	75	220	\$ 2 928 649
33	75	150	\$ 1 996 806	69	250	29.589	\$ 3 787 800
34	75	80	\$ 1 064 963	TOTAL			\$ 219 879 757
35	75	150	\$ 1 996 806				

Tabla 5.7. Costos R28 en PVC IANC=38.32

5.1.1.2 Análisis de VPN

A partir de la cantidad de agua fugada anual y teniendo en cuenta el costo del agua enunciado en la sección 3.3.1.2 se halla el costo total del agua fugada para cada una de las suposiciones de IANC.

IANC DISEÑO (AÑO 2028)	10.106	18.021	27.823	38.32
2008	\$ 124 890 300	\$ 244 372 166	\$ 442 093 479	\$ 682 914 552
2009	\$ 124 385 678	\$ 243 386 895	\$ 439 708 904	\$ 680 338 931
2010	\$ 123 879 912	\$ 242 399 410	\$ 437 302 924	\$ 677 724 141
2011	\$ 123 365 483	\$ 241 387 050	\$ 434 879 979	\$ 674 423 017
2012	\$ 122 834 379	\$ 240 366 984	\$ 432 406 356	\$ 672 476 483
2013	\$ 122 299 662	\$ 239 329 387	\$ 429 924 134	\$ 669 824 800
2014	\$ 121 753 031	\$ 238 277 725	\$ 427 399 248	\$ 667 123 932
2015	\$ 121 196 708	\$ 237 215 393	\$ 424 854 517	\$ 664 431 819
2016	\$ 120 632 890	\$ 236 131 805	\$ 422 293 636	\$ 661 698 258
2017	\$ 120 074 984	\$ 235 029 951	\$ 419 681 995	\$ 658 926 995
2018	\$ 119 491 431	\$ 233 926 864	\$ 417 061 166	\$ 656 148 443
2019	\$ 118 883 673	\$ 232 797 311	\$ 414 396 232	\$ 653 365 952
2020	\$ 118 299 447	\$ 231 658 125	\$ 411 709 483	\$ 650 556 020
2021	\$ 117 683 063	\$ 230 497 704	\$ 409 004 014	\$ 647 695 173
2022	\$ 117 047 375	\$ 229 318 498	\$ 406 244 408	\$ 644 839 982
2023	\$ 116 417 587	\$ 228 122 915	\$ 403 471 909	\$ 641 940 074
2024	\$ 115 771 673	\$ 226 913 317	\$ 400 670 089	\$ 639 025 072
2025	\$ 115 110 973	\$ 225 677 286	\$ 397 803 045	\$ 636 071 200
2026	\$ 114 449 068	\$ 224 431 667	\$ 394 950 495	\$ 633 107 832
2027	\$ 113 775 240	\$ 223 163 783	\$ 392 037 746	\$ 630 137 614
2028	\$ 113 477 880	\$ 221 890 595	\$ 389 105 844	\$ 627 110 049

Tabla 5.8. Costos (COP) del agua fugada con IANC variable para la red R28 en PVC

A partir de los valores ilustrados en las tablas anteriores, se realiza un análisis de VPN con una tasa de descuento apropiada (ver sección 3.3). Se realiza además una comparación entre los valores de VPN de agua fugada y los costos de construcción del sistema para cada una de las situaciones de fuga.

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 149 542 885	\$ 0	0%	\$ 0	0%
10.106	\$ 164 359 555	\$ 1 046 224 880	637%	\$ 812 334 046	494%
18.021	\$ 170 247 334	\$ 2 047 941 612	1203%	\$ 1 588 408 995	933%
27.823	\$ 199 367 731	\$ 3 669 417 738	1841%	\$ 2 785 423 250	1397%
38.32	\$ 219 879 757	\$ 5 737 648 990	2609%	\$ 4 489 181 896	2042%

Tabla 5.9. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en PVC (COP)

A continuación se muestran los resultados gráficamente.

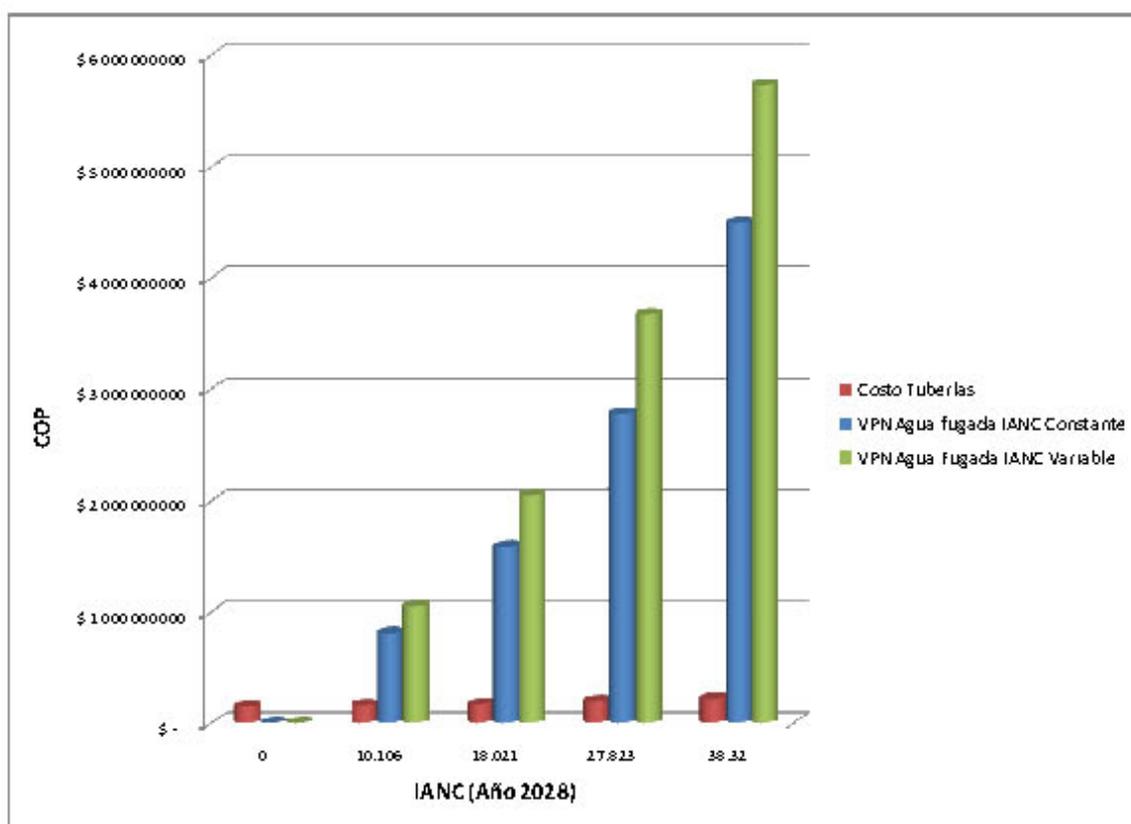


Gráfico 5.1. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en PVC (COP)

5.1.2 Andalucía Alta

A partir de los diferentes diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.3 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 212 924 534	\$ 0	0%	\$ 0	0%
8.719	\$ 215 441 722	\$ 175 019 963	81%	\$ 145 726 846	68%
17.235	\$ 225 756 957	\$ 379 885 326	168%	\$ 317 700 460	141%
27.729	\$ 233 121 515	\$ 695 236 667	298%	\$ 585 360 508	251%
37.118	\$ 240 366 976	\$ 1 064 366 942	443%	\$ 900 557 602	375%

Tabla 5.10. Análisis de VPN y comparación agua fugada Andalucía Alta en PVC (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

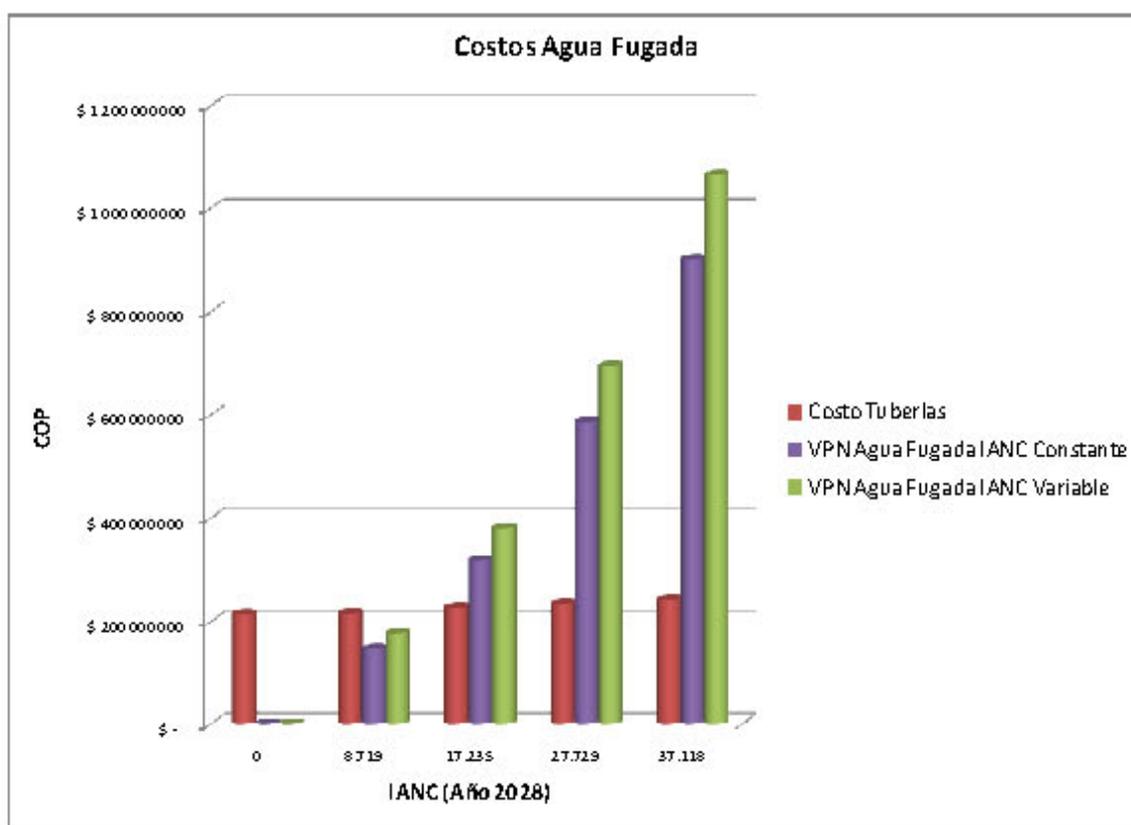


Gráfico 5.2. Análisis de VPN y comparación agua fugada Andalucía Alta en PVC (COP)

5.1.3 Sector 35 Bogotá

A partir de los diferentes diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.3 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 423 484 793	\$ 0	0%	\$ 0	0%
9.711	\$ 429 788 753	\$ 561 596 340	131%	\$ 409 312 404	95%
17.972	\$ 441 343 822	\$ 1 117 981 712	253%	\$ 833 796 527	189%
28.047	\$ 469 798 316	\$ 1 931 023 180	411%	\$ 1 483 417 175	316%
37.34	\$ 493 778 884	\$ 2 892 174 701	586%	\$ 2 267 825 935	459%

Tabla 5.11. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en PVC (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

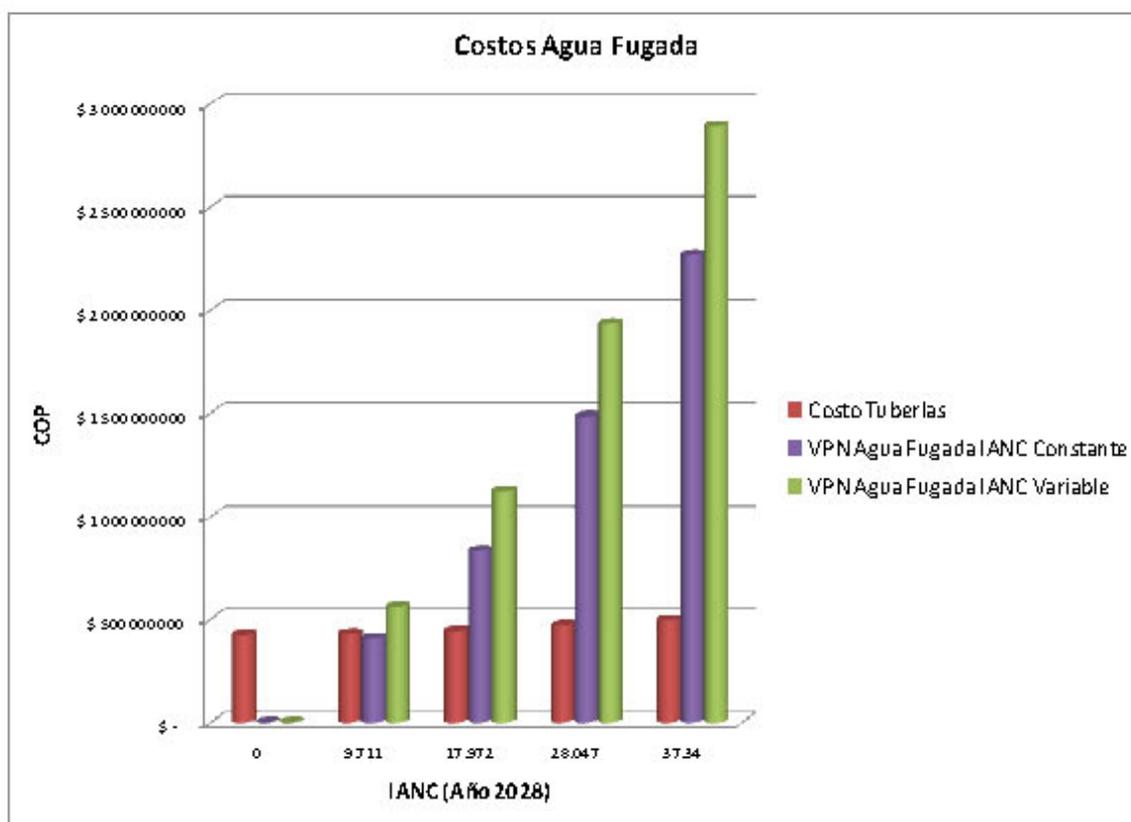


Gráfico 5.3. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en PVC (COP)

5.1.4 Candelaria

A partir de los diferentes diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.3 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 167 668 624	\$ 0	0%	\$ 0	0%
9.465	\$ 168 817 607	\$ 322 437 956	191%	\$ 264 846 621	157%
18.854	\$ 175 079 384	\$ 712 301 733	407%	\$ 588 608 744	336%
28.813	\$ 185 502 734	\$ 1 228 545 383	662%	\$ 1 025 364 109	553%
37.467	\$ 191 631 699	\$ 1 805 640 602	942%	\$ 1 517 853 930	792%

Tabla 5.12. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en PVC (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

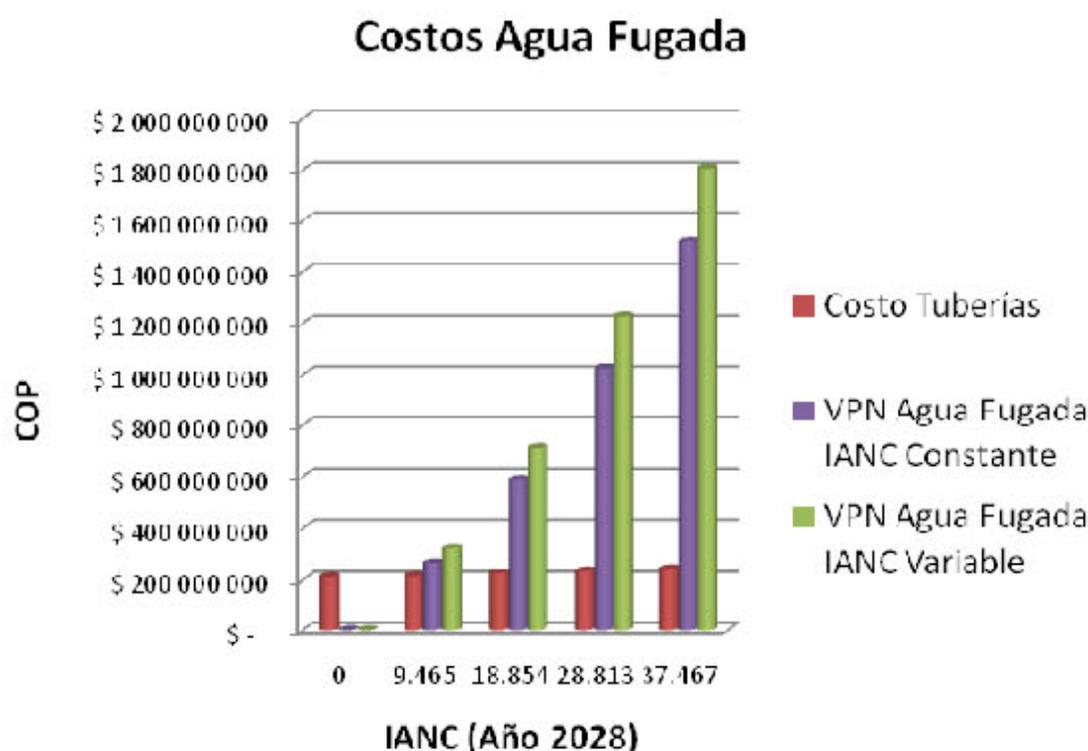


Gráfico 5.4. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en PVC (COP)

5.1.5 La Cumbre

A partir de los diferentes diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.3 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	IANC variable		IANC Constante	
	Costo de Tuberías	VPN Agua fugada	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 199 237 773	\$ 0	\$ 0	0%
7.153	\$ 201 538 987	\$ 53 302 356	\$ 45 895 674	26%
17.406	\$ 202 904 430	\$ 145 846 690	\$ 125 545 711	62%
27.445	\$ 205 040 572	\$ 262 330 472	\$ 225 344 669	110%
36.194	\$ 205 040 572	\$ 392 655 432	\$ 337 929 778	165%

Tabla 5.13. Análisis de VPN y comparación agua fugada La Cumbre en PVC (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

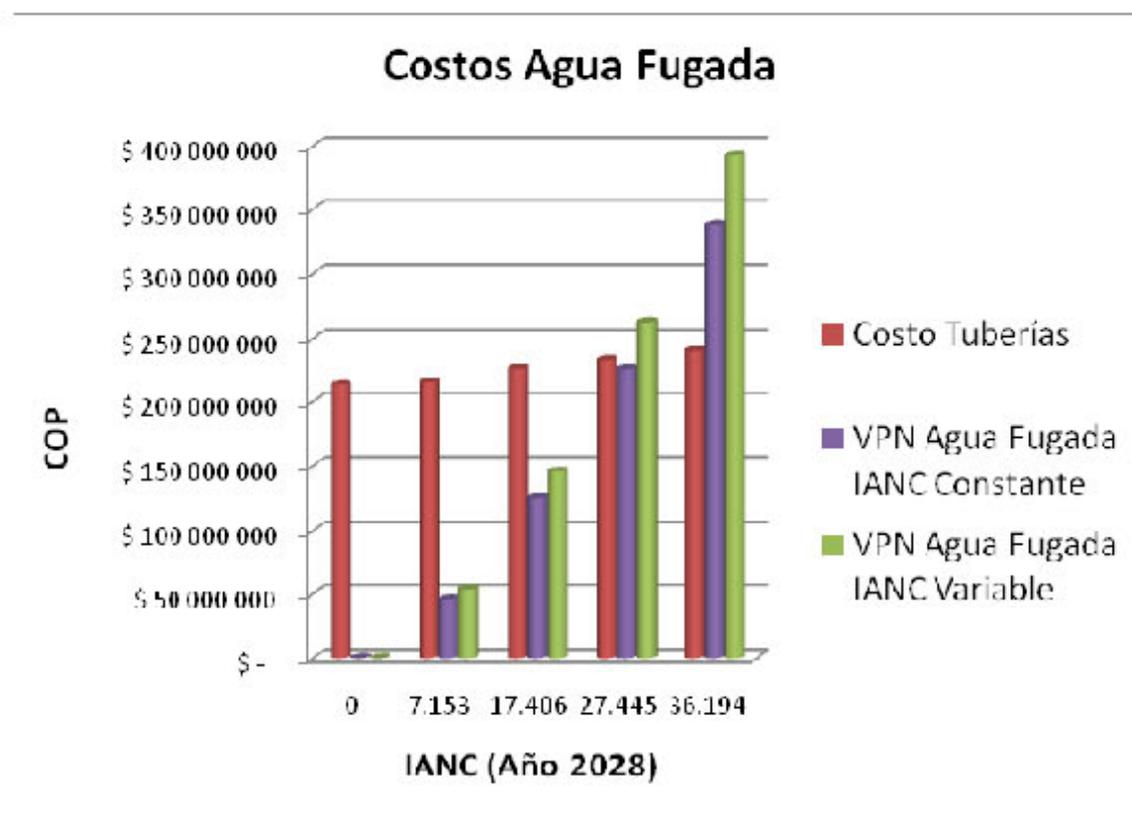


Gráfico 5.5. Análisis de VPN y comparación agua fugada La Cumbre en PVC (COP)

5.2 Para Hierro Dúctil

5.2.1 R28

A partir de los diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.4 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	IANC variable		IANC Constante	
	Costo de Tuberías	VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada
0	\$ 522 894 616	\$ 0	0%	\$ 0
8.972	\$ 569 621 236	\$ 920 465 137	162%	\$ 712 197 314
18.816	\$ 616 755 082	\$ 2 132 905 313	346%	\$ 1 674 722 774
28.879	\$ 666 815 816	\$ 3 701 360 303	555%	\$ 2 934 089 276
38.46	\$ 681 660 420	\$ 5 666 661 835	831%	\$ 4 515 832 818

Tabla 5.14. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en HIERRO DÚCTIL (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

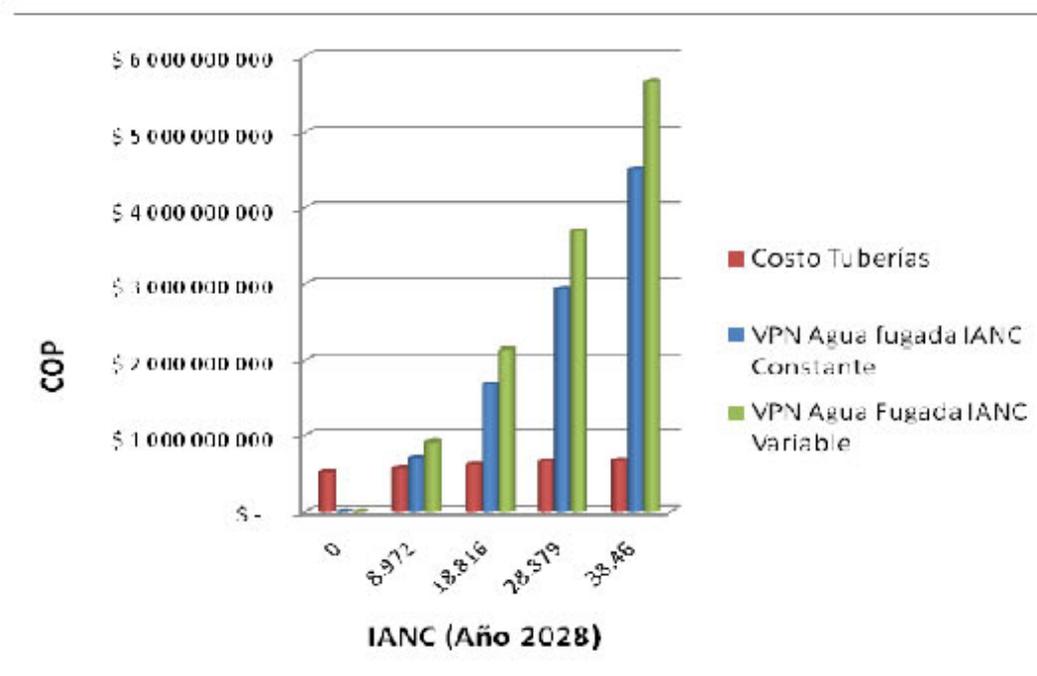


Gráfico 5.6. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en HIERRO DÚCTIL (COP)

5.2.2 Andalucía alta

A partir de los diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.4 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 1 256 724 815	\$ 0	0%	\$ 0	0%
9.115	\$ 1 291 247 679	\$ 185 908 545	14%	\$ 153 009 268	12%
19.123	\$ 1 329 506 392	\$ 436 296 099	33%	\$ 360 731 666	27%
27.774	\$ 1 369 495 163	\$ 700 402 438	51%	\$ 586 675 758	43%
38.186	\$ 1 397 682 807	\$ 1 119 106 420	80%	\$ 942 476 643	67%

Tabla 5.15. Análisis de VPN y comparación agua fugada ANDALUCÍA ALTA en HIERRO DÚCTIL (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

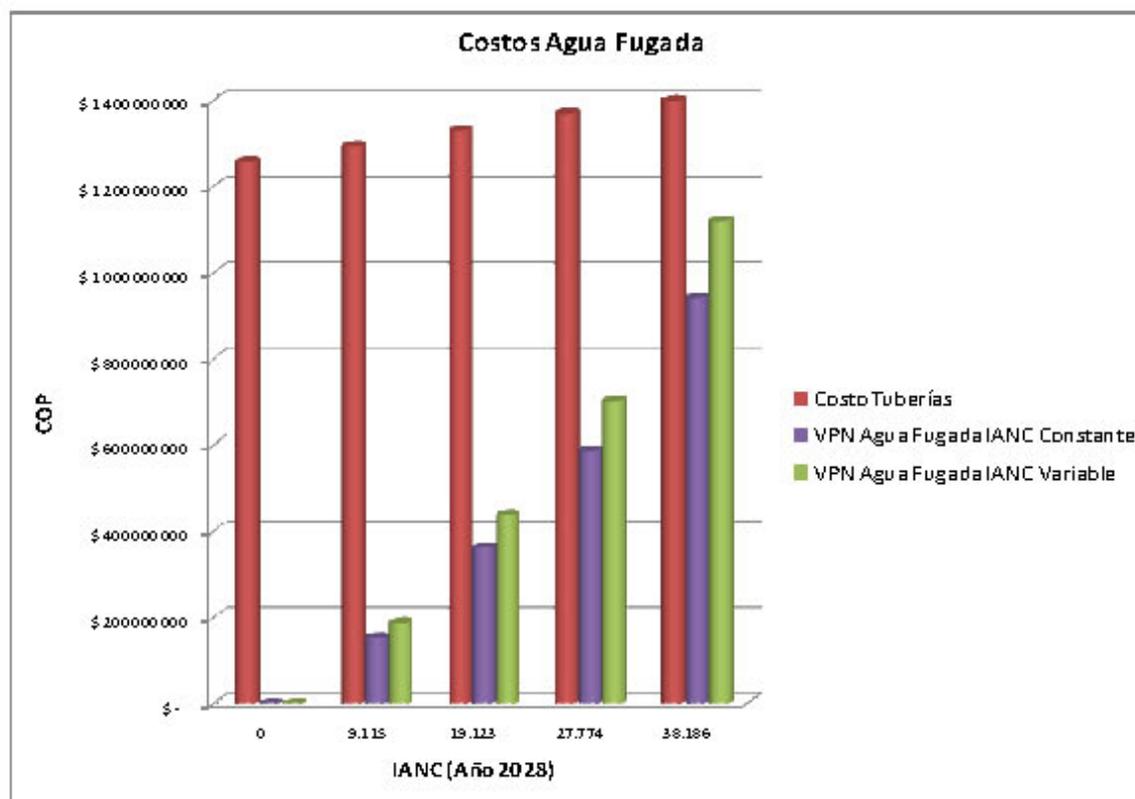


Gráfico 5.7. Análisis de VPN y comparación agua fugada ANDALUCÍA ALTA en HIERRO DÚCTIL (COP)

5.2.3 Sector 35 Bogotá

A partir de los diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.4 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 2 252 678 236	\$ 0	0%	\$ 0	0%
8.12	\$ 2 287 663 816	\$ 459 526 616	20%	\$ 336 326 306	15%
17.345	\$ 2 358 747 503	\$ 1 053 339 851	45%	\$ 798 603 057	34%
26.465	\$ 2 384 306 904	\$ 1 769 527 806	74%	\$ 1 369 631 059	57%
36.739	\$ 2 419 924 703	\$ 2 831 761 626	117%	\$ 2 210 126 199	91%

Tabla 5.16. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en HIERRO DÚCTIL (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

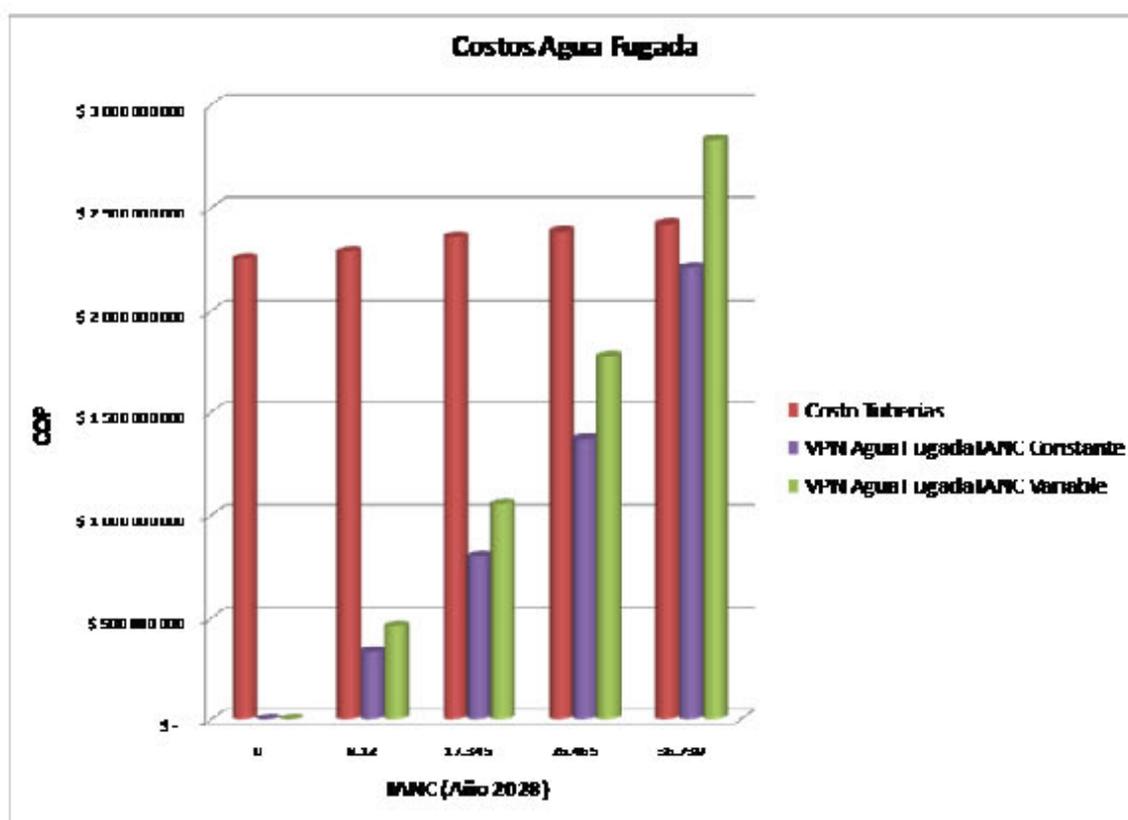


Gráfico 5.8. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en HIERRO DÚCTIL (COP)

5.2.4 Candelaria

A partir de los diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.4 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 1 139 036 401	\$ 0	0%	\$ 0	0%
9.017	\$ 1 142 181 640	\$ 306 247 255	27%	\$ 251 068 449	22%
18.607	\$ 1 165 699 911	\$ 697 207 241	60%	\$ 579 134 750	50%
27.851	\$ 1 166 451 595	\$ 1 171 726 913	100%	\$ 977 914 309	84%
36.089	\$ 1 166 451 595	\$ 1 724 029 280	148%	\$ 1 430 505 589	123%

Tabla 5.17. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

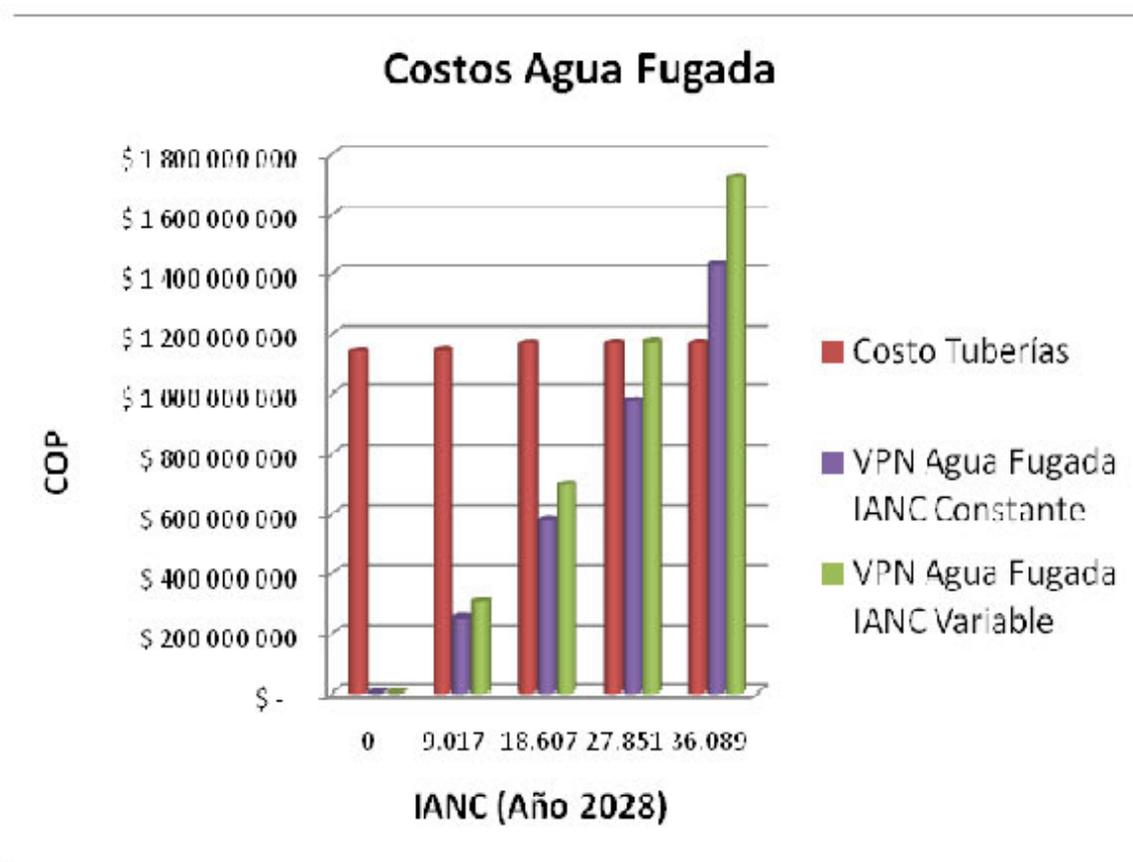


Gráfico 5.9. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)

5.2.5 La Cumbre

A partir de los diseños realizados acorde con los diferentes IANC supuestos y de la función de costo ilustrada en la Ecuación 3.4 se obtienen los siguientes resultados de costo para los sistemas, se incluye además el VPN del agua fugada para cada IANC y cada suposición de su comportamiento, acorde con la metodología planteada en la sección 3.3 y su respectiva comparación porcentual:

IANC	Costo de Tuberías	IANC variable		IANC Constante	
		VPN Agua fugada	Comparación	VPN Agua fugada	Comparación
0	\$ 1 363 282 367	\$ 0	0%	\$ 0	0%
8.661	\$ 1 369 103 693	\$ 65 858 912	5%	\$ 56 488 909	4%
18.324	\$ 1 373 520 703	\$ 155 891 615	11%	\$ 133 652 542	10%
27.348	\$ 1 381 196 151	\$ 260 759 761	19%	\$ 224 248 423	16%
37.683	\$ 1 413 195 993	\$ 418 434 755	30%	\$ 360 238 672	25%

Tabla 5.18. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)

Gráficamente los resultados mostrados en la Tabla 5.10 se representan de la siguiente manera:

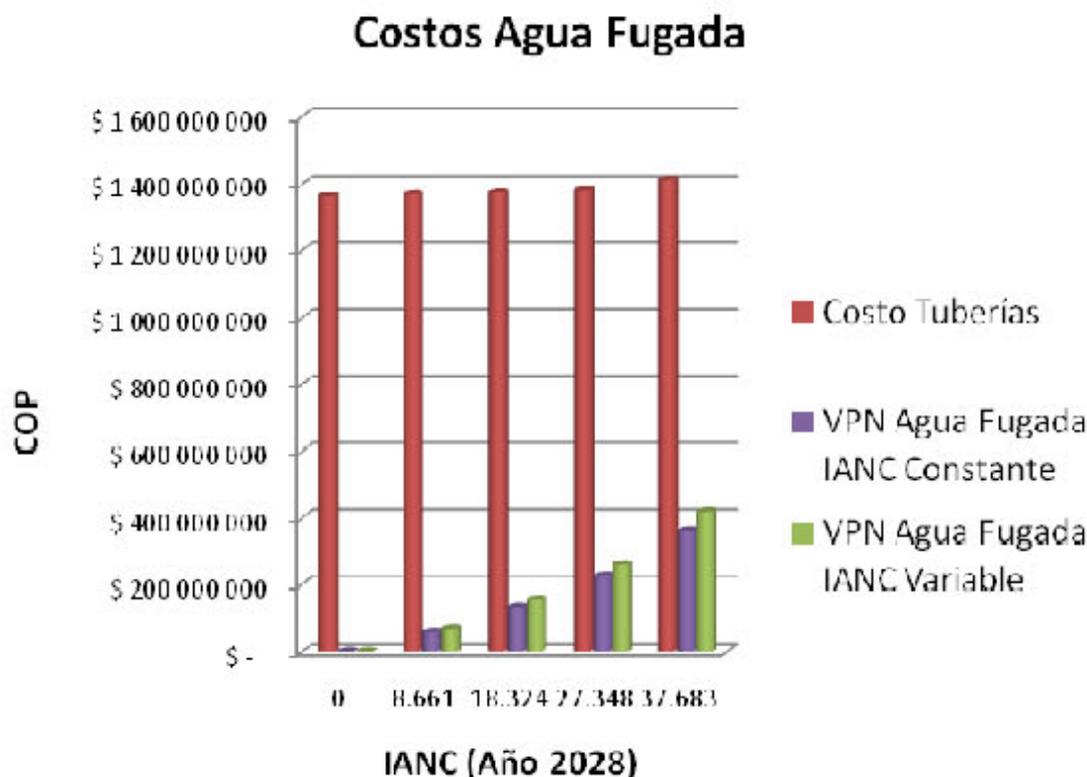


Gráfico 5.10. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)

6 ANÁLISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Acerca del IANC

6.1.1 Comportamiento del IANC variable en el tiempo

Se observa de los resultados de las diferentes modelaciones hidráulicas que el comportamiento del IANC en el tiempo, cuando se tienen los exponentes y los emisores constantes, es en general para la mayoría de las modelaciones decreciente con una tendencia hacia un decrecimiento lineal, pero se observa que este decrecimiento tiene una pendiente negativa menor conforme el valor del IANC se reduce.

El comportamiento cuasi-lineal del decrecimiento del IANC en el tiempo, se puede explicar conceptualmente a partir de las ecuaciones básicas de:

- Cálculo del IANC

$$IANC = \frac{AP - AF}{AP} * 100 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

- Cálculo del total del agua Fugada

$$F = \frac{I * D}{(1 - I)} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

- Caudal Fugado en un emisor

$$Q = C_e * \Delta H^\alpha \quad \text{Ecuación 2.5}$$

- Proyección aritmética de la población para la variación en la demanda

(Ver Anexo 2)

- Ecuación de Darcy – Weisbach

$$\left(f \frac{l}{d} + \sum Km \right) \frac{Q^2}{2gA^2} = H$$

Ecuación 6.1

De estas ecuaciones se observa que la variación del agua demanda en el tiempo es de manera lineal y que el IANC es proporcional a la demanda de la red en un momento específico de tiempo y a la cantidad de agua fugada.

Luego se sabe también que teniendo iguales los coeficientes y exponentes de los emisores en cada nodo de la red y dando un valor para el exponente de 0.5, la cantidad de agua fugada (caudal total emitido por los emisores), es proporcional a la presión elevada a la 0.5.

Teniendo que el programa utilizado para el diseño, utiliza la ecuación de Darcy - Weisbach, donde el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la presión, se tiene una compensación entre la variación de la presión al variar las demandas y la variación del caudal emitido por los emisores, lo cual genera que finalmente este varíe de manera lineal con la demanda en la red la cual varía linealmente.

De allí que sea esperable que el comportamiento del IANC en el tiempo sea decreciente linealmente acorde con la variación lineal de la demanda que genera un decrecimiento proporcional en la presión, se debe destacar que es imprescindible que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que todos y cada uno de los nodos de la red tengan emisores.
- Que todos y cada uno de los nodos de la red tengan el mismo coeficiente de emisor.
- Que todos y cada uno de los emisores de la red tengan como exponente un valor de 0.5.
- Que la demanda de la red varíe de forma aritmética en el tiempo.
- Que el diseño de la red se haga basado en la ecuación físicamente basada de Darcy - Weisbach

6.1.1.1 Agua fugada en el tiempo

Las dos suposiciones de comportamiento del IANC enunciadas en la sección 3.2.2.1, muestran comportamientos lineales en el comportamiento de la cantidad de agua fugada en el tiempo (bien sea creciente o decreciente).

Es de esperarse este comportamiento dado que en el caso del IANC constante la cantidad de agua fugada depende únicamente de la demanda, y dado que esta última crece linealmente, entonces la cantidad de agua fugada lo hará también. En el caso del IANC variable se observa un comportamiento

decreciente en la cantidad de agua fugada aunque la cantidad de agua demandada se comporte de manera creciente, esto se debe a que la variación del IANC en el tiempo es decreciente con una pendiente más fuerte que el crecimiento del agua demanda.

Se muestra que al parecer, estas dos condiciones, que si bien se establecieron no son de frontera, si representan un espectro relativamente grande de la posible variación en el comportamiento.

6.2 Acerca de la modelación de fugas

Al modelar fugas en un sistema por medio de emisores, es importante tener en cuenta que es probable que los emisores no sean uniformes en todos los nodos de la red (suposición del presente informe), así que es recomendable tener una red cuyos emisores ya hayan sido calibrados. Pero dado que para este trabajo se realiza una simulación de diseño (momento en el cual obviamente no se conocen las fugas exactas de la red), se considera que esta suposición es confiable.

Al realizar análisis de comportamiento de fugas en el tiempo por medio de emisores, se debe tener en cuenta que es también posible que tanto los exponentes de los emisores como los coeficientes de los emisores puedan variar en el tiempo. En el presente trabajo se tiene en cuenta esta variación en la suposición (ver sección 3.2.2.1.2) en la cual el IANC se mantiene constante en el tiempo y dado que la demanda varía, se hace obvio que los factores de los emisores varíen y en este caso generan un aumento en la cantidad de agua perdida año a año. Mas la variación real de los factores de los emisores en una red depende de muchos factores, (tales como la topología de la red, el tipo de suelo, las cargas regulares en las tuberías, el material de estas, etc.), razón por la cual se hace inmensamente complejo modelar con precisión la variación de los factores de los emisores en el tiempo y por consiguiente del IANC y la cantidad de agua fugada.

Para una modelación más precisa del comportamiento de las fugas en el tiempo, se recomienda realizar un estudio que incluya un número alto de redes reales con diferentes tiempos de uso y durante un tiempo más o menos prolongado (al menos 5 años), en el cual se realicen calibraciones periódicas de las redes que permitan dar conclusiones acerca de la distribución espacial de las fugas, los factores de los emisores en cada nodo que representen fugas y de su comportamiento conforme varía el tiempo.

6.3 De la influencia del agua fugada en el costo de la red

Se observa de los resultados, que existen dos componentes fundamentales que influyen en el sobre costo de un sistema a causa de las fugas de agua, sean estas detectables o no detectables.

El primero, es el sobre costo en la construcción misma a causa del diseño en sí de la red, acorde con la normativa colombiana (MinDesarrollo, 2000), al momento de diseño de un sistema de distribución de agua potable se debe tener en cuenta un valor de IANC, acorde con las series históricas que tenga la compañía, el cual se incluye a manera de "multiplicador" de la demanda. Entonces al tener en cuenta fugas en la red al momento de diseño del sistema, este tiene tuberías de mayor diámetro que si no se tuvieran fugas en la red y evidentemente esto genera que el sistema al momento de ser construido sea más costoso.

Pero no es el anterior el sobre costo más importante; acorde con los resultados, el mayor sobre costo es aquel que se genera por la pérdida misma del agua. Cada metro cubico de agua tiene un valor para la compañía que lo produce (*ver sección 3.3.1.2*), entonces la cantidad de agua que se pierde tiene un sobre costo diario para la empresa. El análisis realizado muestra que en el mejor de los casos, el valor en presente (un valor financiero descontado con una tasa de oportunidad pertinente) representa cientos de millones de pesos y en casos extremos puede representar miles de millones.

Los resultados son contundentes en cuanto al efecto que tiene el agua pérdida por fugas detectables y no detectables sobre la decisión de compra de tuberías con criterio único de mínimo costo; se observa que en valor presente, el agua perdida representa rubros desde cientos y hasta miles de millones de pesos colombianos. Estas son cifras no despreciables en el gremio de la distribución de agua potable, mucho más en un país como Colombia donde la cobertura de acueductos no llega a todos los ciudadanos (ProExport).

Se observa que el porcentaje que representa el costo de las pérdidas de agua es bastante mayor en el material PVC que en el de Hierro dúctil, esto debido básicamente al costo de las tuberías, que en el caso del PVC es ostensiblemente menor que en el caso del hierro dúctil. Los costos y las cantidades de agua fugada en el análisis realizado en este trabajo son similares para una misma red independiente del material que se utilice.

Es sabido que los materiales plásticos tienden a tener mayores variaciones y/o crecimiento en la cantidad de agua fugada en la red, esto debido a que son más propensos a que una vez se forme un orificio, este cambie su forma y crezca, a diferencia de los metálicos en donde, por la misma estructura del material, el agujero que se llegase a formar tiene una tendencia a mantener su forma.

Pero también es conocida la tendencia mundial hacia la construcción de acueductos en materiales plásticos, por lo cual, hacia el futuro son estos los materiales que se deben analizar para buscar soluciones para las empresas.

6.3.1 Para PVC

6.3.1.1 El caso Andalucía Alta

Si se observa la red de Andalucía Alta para PVC (ver sección 5.1.2), en el peor caso de agua perdida allí ilustrado (cercano al 40%) el cual es incluso menor al valor típico para países tercermundistas del 50% dado por (Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero, & Cortes, Publicación en curso), el costo generado en valor presente por el agua perdida es cercano a 4 veces el costo de las tuberías del sistema al momento de su construcción; ahora, observando el caso en el cual el IANC es cercano al 10% se observa que el costo en valor presente del agua perdida es cercano al 75% del costo de las tuberías.

Lo anterior implica que se puede realizar una inversión superior a 3 veces el valor de una tubería de PVC en otro material que garantice una disminución del 30% en la cantidad de agua perdida por fugas y que además garantice un comportamiento hidráulico similar. Y se puede garantizar que aun invirtiendo una cantidad mucho mayor (3 veces) en las tuberías al momento de la construcción del sistema, en el largo plazo (20 años, que para una empresa de acueducto no es demasiado tiempo) la compañía tendrá menos costos (no se pierde tanta agua) y por ende podría eventualmente tener mayores ganancias o disminuir el cargo a los usuarios manteniendo sus utilidades.

6.3.1.2 El caso Candelaria

Para el caso Candelaria, los resultados son aun más críticos que en Andalucía Alta, en el peor caso de fugas, el costo de estas puede ser hasta de 9 veces el costo de las tuberías que conforman la red, mientras que en el mejor de los casos, el costo del agua fugada representa cerca de 2 veces el costo por concepto de tuberías de la red. Este crecimiento se debe especialmente a que la red tiene unas demandas bastante altas.

6.3.1.3 El caso La Cumbre

En este caso, los resultados son mucho menos críticos que en los casos anteriores; en el peor de los casos el costo del agua fugada representa cerca del doble del costo de las tuberías y en el mejor de los casos el costo del agua fugada puede ser solamente cerca del 20% del costo por concepto de tuberías en la red. Pero aún así no es un valor despreciable y si ilustra la posibilidad de

una mayor inversión en mejores materiales para las tuberías. Esta red tiene demandas menores y de allí que la cantidad de agua fugada sea menor, además, el costo de las tuberías es elevado en el sentido en que a causa de la topografía tan escarpada del lugar las pérdidas en las tuberías deben ser altas y por ende este deben ser muy grandes.

En este punto, vale la pena destacar que el análisis aquí presentado no incluye costos ambientales, por lo tanto, si bien el valor ilustrado no es tan alto (comparativamente con el valor de compra de las tuberías), se debería realizar un análisis mas amplio para determinar la influencia que tendría en este caso el agua perdida por fugas.

6.3.1.4 El caso del Sector 35

Este caso es un caso bastante crítico e ilustrativo, el hecho de que sea una red de un tamaño tan grande genera que aunque la demanda por nodo no es muy alta, la demanda total si sea muy alta y por ende el volumen de agua fugada sea muy alto. En esta red el peor de los casos de fuga muestra que el costo del agua fugada llega a ser hasta casi 6 veces el costo de las tuberías de la red, y en el mejor de los casos, el costo del agua perdida iguala el costo de las tuberías de la red.

En general, se observa que las fugas si tienen un costo representativo comparativamente con el costo de las tuberías en el material PVC. Se observa que el costo del agua fugada en una red depende de algunas de sus características específicas tales como su demanda, su topografía y su tamaño.

6.3.2 Para Hierro Dúctil

Para el caso de hierro dúctil en las diferentes redes, se observa que las fugas sí representan un porcentaje importante del costo por concepto de tuberías de la red, aunque no representan porcentajes tan altos como en el caso de PVC. Se observa que el comportamiento en términos de cuál es la red más crítica es similar y que solamente en las dos redes más críticas (Sector 35 y Candelaria), en el peor caso de fugas ilustrado éstas pueden llegar a representar mas del valor total de las tuberías de la red. Si bien estos porcentajes son bastante menores que los presentados en PVC, los valores en dinero no son despreciables así que sí se podría invertir una cantidad importante en otras tuberías, sean metálicas o no, que permitan reducir fugas.

La razón principal por la cual el valor presente neto del costo del agua perdida por fugas, es menos representativo en las redes simuladas en hierro dúctil que en las redes en PVC, es que el costo total de las tuberías necesarias para el sistema es superior en hierro dúctil que en PVC. Este sobre costo de las tuberías se debe principalmente a dos razones:

- Primero, debido a que la rugosidad de las tuberías de hierro dúctil es mayor, en general los diseños requieren de tuberías de mayor diámetro las cuales son evidentemente más costosas.

La grafica siguiente ilustra a manera de ejemplo el caso de la red Andalucía Alta para un IANC = 0%

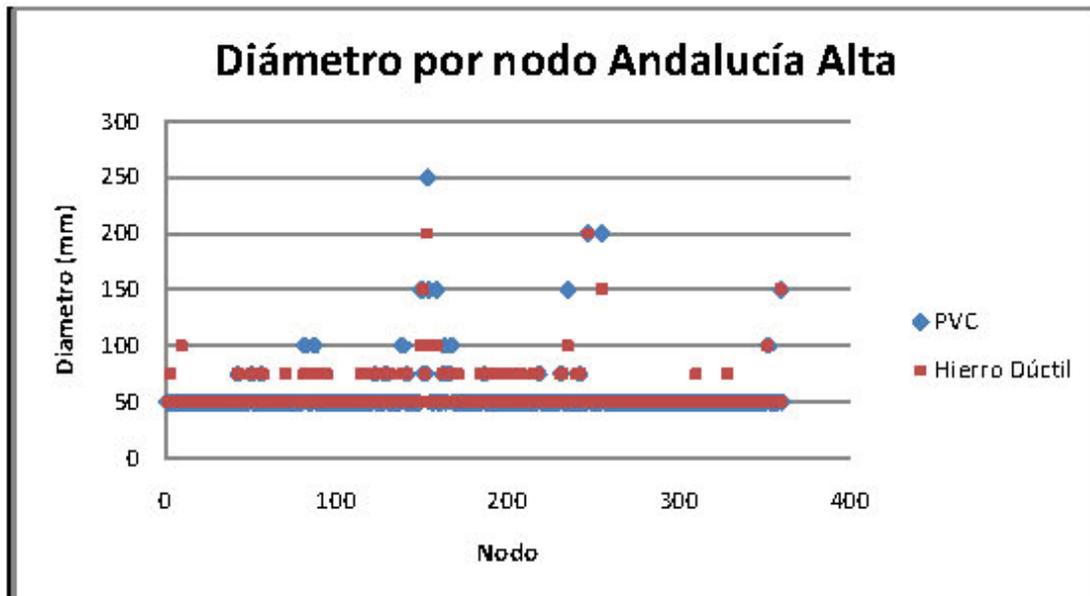


Gráfico 6.1. Comparación diámetros de diseño diferentes materiales Andalucía Alta IANC = 0%

Como se muestra en la gráfica, si existe una tendencia a que en hierro dúctil se tengan diámetros mayores. Ahora bien se observa que la diferencia en los diámetros no es demasiado marcada, razón por la cual se puede concluir que el sobrecosto debido el aumento en los diámetros no tiene mucha influencia en el sobrecosto de las tuberías del sistema.

- Segundo, para un diámetro de tubería igual, el costo por metro lineal de la misma es bastante mayor en hierro dúctil que en PVC, razón por la cual, aunque el sistema tuviese diámetros iguales en ambos materiales, el costo de las tuberías del mismo sería ostensiblemente mayor en hierro dúctil que en PVC.

La siguiente gráfica basada en la información contenida en el Anexo 1, muestra una comparación del costo por metro lineal de tubería para diferentes diámetros tanto para PVC como para hierro dúctil.

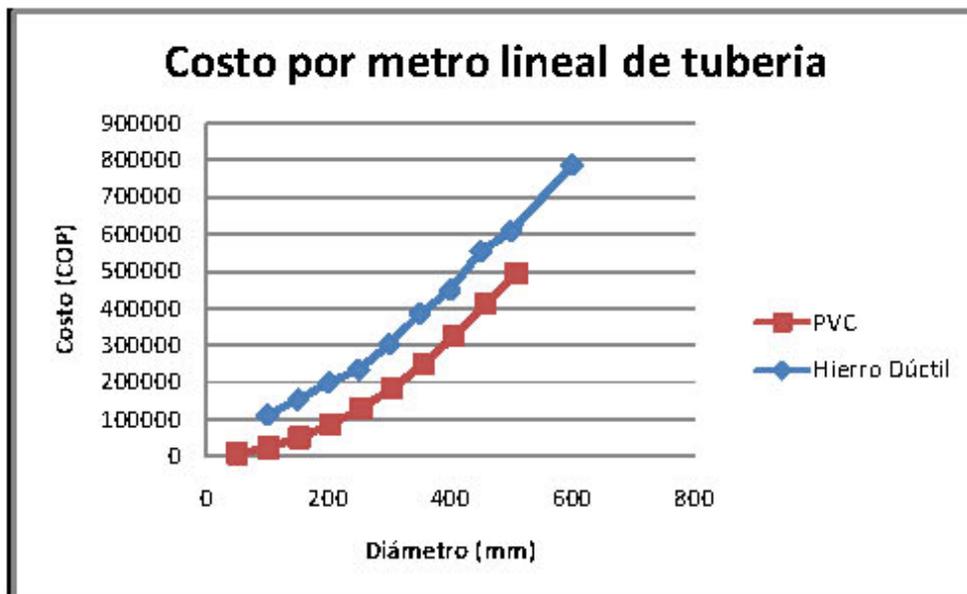


Gráfico 6.2 Costo por metro lineal de tubería (COP)

La gráfica muestra claramente que el hierro dúctil es un material más costoso que el PVC, de allí que este sea la razón que genere el mayor sobre costo en las tuberías del sistema.

Como se observa en el Gráfico 6.1, la mayoría de los diámetros utilizados son relativamente pequeños (menores a 300 mm), y es en estos diámetros en los cuales la diferencia entre el costo por metro lineal de hierro dúctil y el de PVC es mas marcada; de allí que efectivamente las tuberías de los sistemas en hierro dúctil sean mucho mas cotosas que las de PVC. Por consiguiente el VPN del agua perdida por fugas es menos representativo porcentualmente en hierro dúctil que en PVC.

Acorde con los resultados, que como se nombró son contundentes, especialmente para PVC, se observa que para las compañías, en términos de la decisión de compra de tuberías vale la pena, desde el sentido económico, que exploren nuevos materiales que pueden llegar a costar más dinero al momento de su compra pero que garanticen que la cantidad de agua fugada se disminuye en un porcentaje alto. Se aclara que cada red tiene características específicas que generan variaciones en los resultados, pero el ahorro es de tal magnitud que valdría la pena realizar los diseños de la red cuantas veces sea necesario, según los materiales disponibles y las fugas posibles que se generen en estos, incluyendo materiales no convencionales en el país que permitan disminuir fugas, con el objetivo de comparar los costos y encontrar la solución que mas réditos genere a la compañía prestadora del servicio.

Es importante destacar que las compañías proveedores del servicio de agua potable, por lo general cuentan con programas (divisiones o sistemas) de ubicación, control y reparación de fugas detectables, razón por la cual los costos, ejemplificados en este trabajo, pueden llegar a ser reducidos por estos programas. Ahora bien, si se realizan rehabilitaciones es porque las empresas

tienen conocimiento de que estas en el largo plazo les ahorran dinero, pero sería interesante realizar una investigación que permita concluir con precisión la magnitud de este ahorro y como este afectaría los resultados de un análisis como el realizado en este trabajo.

Por último se reflexiona que aunque el problema de sobrecostos de una red a causa del agua fugada por fugas detectables y no detectables y su influencia en la decisión de compras de tuberías, no es el único problema generado por el agua perdida en los sistemas de acueducto. Existen serios problemas ambientales, problemas en el nivel de servicio a los usuarios, problemas de calidad de agua, problemas del desempeño hidráulico de la red, etc. Y estos problemas pueden ser atendidos en parte mediante la compra de tuberías y el mejoramiento de los sistemas constructivos que se utilizan para las redes.

7 BIBLIOGRAFÍA

Acero, J. P. (2003). *Diseño Optimizado de redes de Distribución Incluyendo Fugas*. Proyecto de Grado Pregrado, Universidad de los Andes, Bogota D.C.

Almeida, W. (6 de Octubre de 2008). Comunicación telefonica. (J. Saldarriaga, Entrevistador)

Asian development Bank. (2001). *Asian water supplies, Non-revenue water*.

CIACUA. (2002). *Informe final del proyecto Plano Óptimo de Presiones del Sector 35 de la ciudad de Bogotá*. Bogotá.

CIACUA. (2006). *Informe final del proyecto: Plano Óptimo de Presiones de los Municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro*. Bogotá.

Colombo, A., & Karney, B. (2002). Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture. *Journal of Water Resources Planning and Management* , 128 (6).

Comision de regulación de agua potable y saneamiento basico (CRA). (2004). Resolución CRA No. 287 de 2004 "Por la cual se establece la metodología tarifaria para regular el cálculo de los costos de prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado". Colombia: Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial.

Engelhardt, M., Skipworth, P., Savic, D., Saul, A., & Walters, J. (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water* , 2, 153-170.

EPM. (2007). *Normas de diseño de acueductos alcantarillados y vertimientos industriales*. Medellín: EPM.

Escandón, J. (2008). *Precios Hierro Ductil PAMCOL*.

Kingdom, B., Liemberg, R., & Marin, P. (Diciembre de 2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting*. Recuperado el 21 de Octubre de 2008, de www.ppiaf.org: http://www.ppiaf.org/documents/recent_publications/Reducing_NRW_in_developing_countries.pdf

Lara Mesa, S. (2004). *Efecto del Índice de Agua no contabilizada para acueductos medianos y pequeños en Colombia*. Bogota: Uniandes.

Lopez, C. F. (2008). *Factibilidad Económica de la Renovación de Sistemas de Alcantarillado*. Tesis de Grado Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogota D.C.

Lopez, C. S. (2003). *Diseño de Redes de Agua Potable de Minimo Costo con Algoritmos Genéticos*. Proyecto de Grado Pregrado, Universidad de los Andes, Bogota D.C.

MinDesarrollo. (2000). *Reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico RAS 2000*. Recuperado el 26 de octubre de 2008, de <http://www.cra.gov.co/portal/www/resources/titulob.pdf>

Perez, L. M. (2004). *Rango de factibilidad economica del indice de agua no contabilizada*. Bogota: Uniandes.

Portafolio.com. (26 de Octubre de 2008). *Indicadores Economicos*. Recuperado el 26 de Octubre de 2008, de <http://www.portafolio.com.co/>

ProExport. (s.f.). *Estadísticas Acueducto y Alcantarillado*. Recuperado el 03 de 12 de 2008, de <http://www.proexport.com.co/vbecontent/NewsDetail.asp?ID=5666&IDCompany=20>

Rosssman, L. (2000). *EPANET 2 User's Manual*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.

Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos*. Bogotá D.C., Colombia: Alfaomega.

Saldarriaga, J. G. (2008). Programa REDES. Bogota D.C., Colombia: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Moreno, M. E., Romero, N., & Cortes, O. (Publicacion en curso). Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water* .

Suarez, P. (2008). *Precios Tuberia PVC Pavco*.

SUI. (Marzo de 2008). *Sistema unico de información, gobierno de la Republica de Colombia*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2008, de http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=acu_com_110

Superintendencia de servicios publicos. (2008). *Servicio unico de información (SUI)*. Recuperado el 15 de Octubre de 2008, de www.sui.gov.co

Todini, E. (2008). *Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. Where are we?* Bologna: University of Bologna.

8 LISTAS

TABLAS:

Tabla 3.1: Factores Multiplicadores de demanda.	21
Tabla 3.2: Costos del agua en Colombia	25
Tabla 4.1. Características Embalse R2B	27
Tabla 4.2. Características Nodos R2B	27
Tabla 4.3. Características Tubos R2B	28
Tabla 4.4. Características tubos R2B (Continuación)	29
Tabla 4.5. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m ³) R2B	30
Tabla 4.6. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m ³) R2B (continuación)	31
Tabla 4.7. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m ³) R2B (continuación)	32
Tabla 4.8. Demanda año a año por nodo (Lps) y total consumido (m ³) R2B (continuación)	33
Tabla 4.9 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños R2B PVC	34
Tabla 4.10. Resultados de diámetros para R2B en PVC para IANC=10.074%	35
Tabla 4.11. Resultados de diámetros para R2B en PVC para IANC=18.021%	35
Tabla 4.12. Resultados de diámetros para R2B en PVC para IANC=27.823%	36
Tabla 4.13. Resultados de diámetros para R2B en PVC para IANC=38.32%	36
Tabla 4.14. Resultados de diámetros para R2B en PVC para IANC=0%	37
Tabla 4.15. IANC año a año suponiendo coeficientes y exponentes de emisores constantes en R2B en PVC.	38
Tabla 4.16. Volumen de agua fugada R2B con IANC variable (m ³) en PVC	39
Tabla 4.17. Volumen de agua fugada R2B con IANC variable (m ³) en PVC (continuación)	40
Tabla 4.18. Volumen de agua fugada R2B con IANC constante (m ³) en PVC	40
Tabla 4.19 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Andalucía Alta en PVC	42
Tabla 4.20 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Sector 35 en PVC	44
Tabla 4.21 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Candelaria en PVC	46
Tabla 4.22 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños La Cumbre en PVC	48
Tabla 4.23 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños R2B en Hierro Dúctil	50
Tabla 4.24 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Andalucía Alta en Hierro Dúctil	52
Tabla 4.25 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Sector 35 en Hierro Dúctil	54
Tabla 4.26 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños Candelaria en Hierro Dúctil	56
Tabla 4.27 IANC, exponentes y coeficientes emisores diseños La cumbre en Hierro Dúctil	58
Tabla 5.1. Costos R2B en PVC IANC=0	60
Tabla 5.2. Costos R2B en PVC IANC=0 (continuación)	61
Tabla 5.3. Costos R2B en PVC IANC=10.074	61
Tabla 5.4. Costos R2B en PVC IANC=10.074 (continuación)	62
Tabla 5.5. Costos R2B en PVC IANC=18.021	62
Tabla 5.6. Costos R2B en PVC IANC=27.823	63
Tabla 5.7. Costos R2B en PVC IANC=38.32	64
Tabla 5.8. Costos (COP) del agua fugada con IANC variable para la red R2B en PVC	65
Tabla 5.9. Análisis de VPN y comparación agua fugada R2B en PVC (COP)	65
Tabla 5.10. Análisis de VPN y comparación agua fugada Andalucía Alta en PVC (COP)	66
Tabla 5.11. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en PVC (COP)	68
Tabla 5.12. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en PVC (COP)	69
Tabla 5.13. Análisis de VPN y comparación agua fugada La Cumbre en PVC (COP)	70
Tabla 5.17. Análisis de VPN y comparación agua fugada R2B en HIERRO DÚCTIL (COP)	71
Tabla 5.18. Análisis de VPN y comparación agua fugada ANDALUCÍA ALTA en HIERRO DÚCTIL (COP)	72
Tabla 5.19. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en HIERRO DÚCTIL (COP)	73
Tabla 5.20. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)	74
Tabla 5.21. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP)	75

GRÁFICOS:

Gráfico 4.1. Resultados para diámetros R28 en PVC	37
Gráfico 4.2 Variación del IANC con factores de emisores constantes para R28 en PVC	39
Gráfico 4.3. Volumen de agua fugada R28 en PVC con IANC variable.....	41
Gráfico 4.4. Volumen de agua fugada R28 en PVC con IANC constante.....	41
Gráfico 4.5 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Andalucía Alta en PVC.....	42
Gráfico 4.6. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en PVC con IANC variable	43
Gráfico 4.7. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en PVC con IANC constante	43
Gráfico 4.8 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Sector 35 en PVC.....	44
Gráfico 4.9. Volumen de agua fugada Sector 35 en PVC con IANC variable.....	45
Gráfico 4.10. Volumen de agua fugada Sector 35 en PVC con IANC constante.....	45
Gráfico 4.11 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Candelaria en PVC.....	46
Gráfico 4.12. Volumen de agua fugada Candelaria en PVC con IANC variable	47
Gráfico 4.13. Volumen de agua fugada Candelaria en PVC con IANC constante	47
Gráfico 4.14 Variación del IANC con factores de emisores constantes para La Cumbre en PVC.....	48
Gráfico 4.15. Volumen de agua fugada La Cumbre en PVC con IANC variable.....	49
Gráfico 4.16. Volumen de agua fugada La Cumbre en PVC con IANC constante.....	49
Gráfico 4.17 Variación del IANC con factores de emisores constantes para R28 en Hierro Dúctil.....	50
Gráfico 4.18. Volumen de agua fugada R28 en Hierro Dúctil con IANC variable.....	51
Gráfico 4.19. Volumen de agua fugada R28 en Hierro Dúctil con IANC constante.....	51
Gráfico 4.20 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Andalucía Alta en Hierro Dúctil.....	52
Gráfico 4.21. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en Hierro Dúctil con IANC variable	53
Gráfico 4.22. Volumen de agua fugada Andalucía Alta en Hierro Dúctil con IANC constante.....	53
Gráfico 4.23 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Sector 35 en Hierro Dúctil....	54
Gráfico 4.24. Volumen de agua fugada Sector 35 en Hierro Dúctil con IANC variable.....	55
Gráfico 4.25. Volumen de agua fugada Sector 35 en Hierro Dúctil con IANC constante.....	55
Gráfico 4.26 Variación del IANC con factores de emisores constantes para Candelaria en Hierro Dúctil.....	56
Gráfico 4.27. Volumen de agua fugada Candelaria en Hierro Dúctil con IANC variable.....	57
Gráfico 4.28. Volumen de agua fugada Candelaria en Hierro Dúctil con IANC constante.....	57
Gráfico 4.29 Variación del IANC con factores de emisores constantes para La cumbre en Hierro Dúctil.....	58
Gráfico 4.30. Volumen de agua fugada La cumbre en Hierro Dúctil con IANC variable	59
Gráfico 4.31. Volumen de agua fugada La cumbre en Hierro Dúctil con IANC constante	59
Gráfico 5.1. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en PVC (COP).....	66
Gráfico 5.2. Análisis de VPN y comparación agua fugada Andalucía Alta en PVC (COP)	67
Gráfico 5.3. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en PVC (COP).....	68
Gráfico 5.4. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en PVC (COP).....	69
Gráfico 5.5. Análisis de VPN y comparación agua fugada La Cumbre en PVC (COP).....	70
Gráfico 5.6. Análisis de VPN y comparación agua fugada R28 en HIERRO DÚCTIL (COP).....	71
Gráfico 5.7. Análisis de VPN y comparación agua fugada ANDALUCÍA ALTA en HIERRO DÚCTIL (COP)...	72
Gráfico 5.8. Análisis de VPN y comparación agua fugada Sector 35 en HIERRO DÚCTIL (COP)	73
Gráfico 5.9. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP).....	74
Gráfico 5.10. Análisis de VPN y comparación agua fugada Candelaria en HIERRO DÚCTIL (COP).....	75
Gráfico 6.1. Comparación diámetros de diseño diferentes materiales Andalucía Alta IANC = 0%.....	82
Gráfico 6.2 Costo por metro lineal de tubería (COP).....	83

ECUACIONES:

<i>Ecuación 2.1</i>	7
<i>Ecuación 2.2</i>	8
<i>Ecuación 2.3</i>	8
<i>Ecuación 2.4</i>	11
<i>Ecuación 2.5</i>	12
<i>Ecuación 2.6</i>	13
<i>Ecuación 2.7</i>	13
<i>Ecuación 2.8</i>	13
<i>Ecuación 3.1</i>	23
<i>Ecuación 3.2</i>	23
<i>Ecuación 3.3</i>	23
<i>Ecuación 3.4</i>	23
<i>Ecuación 3.5</i>	25
<i>Ecuación 3.6</i>	26
<i>Ecuación 3.7</i>	26
<i>Ecuación 4.1</i>	34
<i>Ecuación 6.1</i>	76

FIGURAS:

<i>Figura 1: R2B</i>	15
<i>Figura 2. Red Andalucía Alta</i>	16
<i>Figura 3. Red Sector 35</i>	17
<i>Figura 4. Red Candalaria</i>	18
<i>Figura 5. Red La Cumbre</i>	19

ANEXOS:

<i>Anexo 1: Análisis de precios unitarios para funciones de costo</i>	91
<i>Anexo 2: Análisis para variación de demanda en el tiempo</i>	93

9 ANEXOS

Anexo 1: Análisis de precios unitarios para funciones de costo

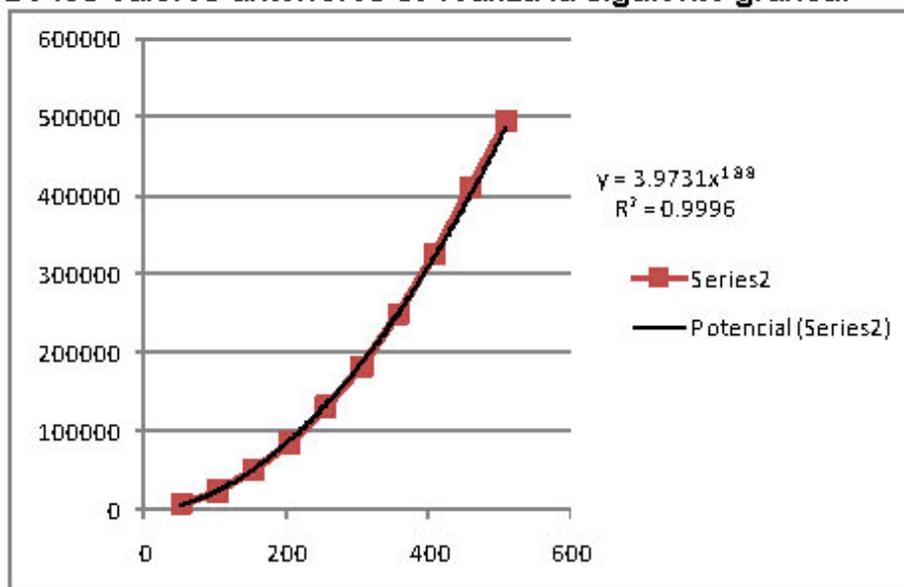
Acorde con la forma que deben tener las ecuaciones de las funciones de costo (ver Ecuación 3.1) para su utilización en el programa REDES (Saldarriaga, 2008) se realiza el siguiente análisis:

Primero se tiene el listado de precios para PVC:

Tabla Precios PVC resumida		
D (in)	D (mm)	Precio (COP) ML
2	50.8	6741.735
4	101.6	22795.08
6	152.4	49479.045
8	203.2	83861.085
10	254	129772.335
12	304.8	182529.27
14	355.6	247431.03
16	406.4	324758.28
18	457.2	411674.34
20	508	494472.825

(Suarez, 2008)

De los valores anteriores se realiza la siguiente gráfica:

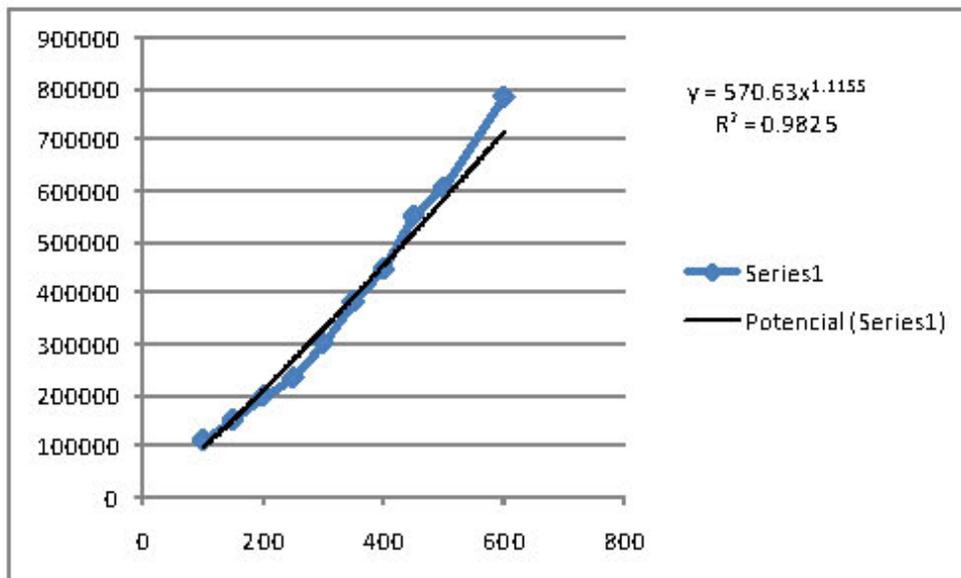


De la regresión potencial de los anteriores datos se obtuvo la Ecuación 3.3.

Luego se realiza el mismo procedimiento para Hierro Dúctil:

d (mm)	Precio COP ML
100	111244
150	152772
200	198360
250	234552
300	302760
350	384540
400	447760
450	553320
500	606912
600	786480

(Escandón, 2008)



Y se obtiene la Ecuación 3.4

Anexo 2: Análisis para variación de demanda en el tiempo

A partir de los siguientes datos censales:

	1973	1985	1993	2005
Bogota D.C.	2861913	4236490	5484244	6778691
Valle del Cauca	2392715	3027247	3736090	4060196

Se realizan las proyecciones pertinentes para cada región y la tabla de multiplicación de demanda acorde:

Crecimiento aritmético Bogotá D.C.

Año	Población (HAB)	X_i^2	$X_i \cdot Y_i$
1973	2861913	3892729	5646554349
1985	4236490	3940225	8409432650
1993	5484244	3972049	1.093E+10
2005	6778691	4020025	1.3591E+10
1989	4840334.5	15825028	3.8577E+10
PROMEDIO		SUMA	

$n \cdot X_p \cdot Y_p$	38509701282	$X_p = \text{Año promedio}$
$n \cdot X_p^2$	15824484	$Y_p = \text{Poblacion Promedio}$
m	124374.0147	

Año	Población Proye	Factor Multiplicador Demanda
2008	7203441	1.000
2009	7327815	1.017
2010	7452189	1.035
2011	7576563	1.052
2012	7700937	1.069
2013	7825311	1.086
2014	7949685	1.104
2015	8074059	1.121
2016	8198433	1.138
2017	8322807	1.155
2018	8447181	1.173
2019	8571555	1.190
2020	8695929	1.207
2021	8820303	1.224
2022	8944677	1.242
2023	9069051	1.259
2024	9193425	1.276
2025	9317799	1.294
2026	9442173	1.311
2027	9566547	1.328
2028	9690921	1.345

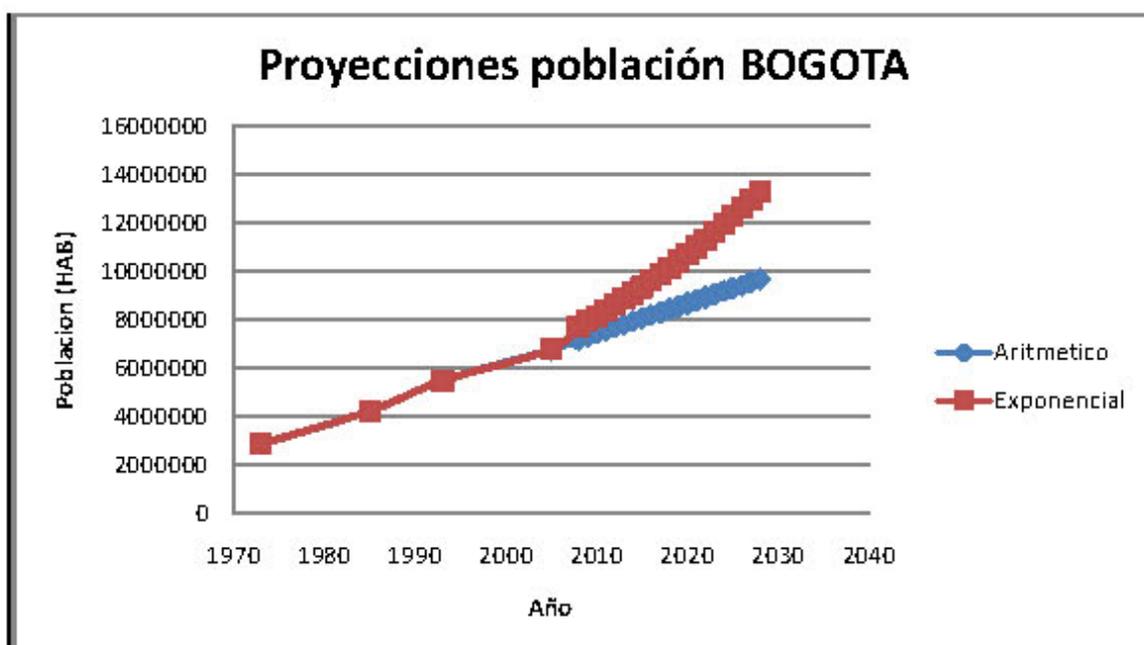
Crecimiento Exponencial | BOGOTÁ DC

Año	Población (HAB)	LN (P)	XI ²	XI*YI
1973	2861913		14.8670	3892.729
1985	4236490		15.2592	3940.225
1993	5434244		15.5174	3972.049
2005	6778691		15.7293	4020.025
1989			15.3432	15825028
PROMEDIO				SUMA
				122085.5888

$n \cdot X_p \cdot Y_p$	122070.7595	X_p = Año promedio
$n \cdot X_p \cdot Z$	158244.84	Y_p = LN (P) Promedio
m	0.027259699	

$Ln(Y) = Y_p + m^2(X - X_p)$ Acorde con esta ecuación se realiza la proyección

Año	LN (Y)	Población Proyectada	Factor Multiplicador Demanda
2008	15.861	7734234	1.074
2009	15.888	7947967	1.103
2010	15.916	8167606	1.134
2011	15.943	8393315	1.165
2012	15.970	8625261	1.197
2013	15.997	8863617	1.230
2014	16.025	9108560	1.264
2015	16.052	9360272	1.299
2016	16.079	9618940	1.335
2017	16.107	9884756	1.372
2018	16.134	10157917	1.410
2019	16.161	10438628	1.449
2020	16.188	10727096	1.489
2021	16.216	11023535	1.530
2022	16.243	11328167	1.573
2023	16.270	11641216	1.616
2024	16.297	11962917	1.661
2025	16.325	12293508	1.707
2026	16.352	12633235	1.754
2027	16.379	12982350	1.802
2028	16.406	13341112	1.852



Crecimiento Aritmético VALLE DEL CAUCA

Año	Población (HAB)	XI ²	XI*YI
1973	2392715		3892729
1985	3027247		3940225
1993	3736090		3972049
2005	4060196		4020025
1989	3304062		15825028
PROMEDIO			SUMA

$n \cdot X_p \cdot Y_p$	26287117272	X_p - Año promedio
$n \cdot X_p^2$	15824484	Y_p - Poblacion Promedio
m	54255.63971	

$Y = Y_p + m \cdot (X - X_p)$ Acorde con esta ecuación se realiza la proyección

Año	Población Proyectada	Factor Multiplicador Demanda
2008	4334919	1.000
2009	4389175	1.013
2010	4443430	1.025
2011	4497686	1.038
2012	4551942	1.050
2013	4606197	1.063
2014	4660453	1.075
2015	4714709	1.088
2016	4768964	1.100
2017	4823220	1.113
2018	4877476	1.125
2019	4931731	1.138
2020	4985987	1.150
2021	5040242	1.163
2022	5094498	1.175
2023	5148754	1.188
2024	5203009	1.200
2025	5257265	1.213
2026	5311521	1.225
2027	5365776	1.238
2028	5420032	1.250

Crecimiento Exponencial VALLE DEL CAUCA

Año	Población (HAB)	LN (P)	XI ²	XI*YI
1973	2392715		14.6879	3892729
1985	3027247		14.9232	3940225
1993	3736090		15.1336	3972049
2005	4060196		15.2167	4020025
1989			14.9903	15825028
PROMEDIO				SUMA

$n \cdot X_p \cdot Y_p$	119263.2155	X_p - Año promedio
$n \cdot X_p^2$	15824484	Y_p - LN P Promedio
m	0.017099972	

Año	LN (Y)	Población Proyectada	Factor Multiplicador Demanda
2008	15.315	4480514	1.034
2009	15.332	4557789	1.051
2010	15.349	4636398	1.070
2011	15.367	4716362	1.088
2012	15.384	4797705	1.107
2013	15.401	4880451	1.126
2014	15.418	4964624	1.145
2015	15.435	5050249	1.165
2016	15.452	5137351	1.185
2017	15.469	5225955	1.206
2018	15.486	5316087	1.226
2019	15.503	5407773	1.247
2020	15.520	5501041	1.269
2021	15.538	5595918	1.291
2022	15.555	5692431	1.313
2023	15.572	5790608	1.336
2024	15.589	5890479	1.359
2025	15.606	5992072	1.382
2026	15.623	6095417	1.406
2027	15.640	6200545	1.430
2028	15.657	6307486	1.455

