

TESIS DE MAESTRÍA

**DESARROLLO HISTÓRICO DE LAS RDAP EN EL CASO COLOMBIANO, Y SU RELACIÓN CON LA
EXTENSIÓN Y EL NÚMERO DE SUSCRIPTORES**

Natalia Hernández Mora

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
3. Caracterización geométricas, topológicas e hidráulicas de las RDAP	3
3.1 Clasificación de las RDAP según su geometría	3
3.1.1 Índices geométricos	3
3.2 Clasificación de las RDAP según su función	5
3.2.1 Índice de funcionalidad	5
3.3 Clasificación de las RDAP según su topología	5
3.3.1 Teoría de Grafos	6
3.3.2 Branch Index (BI)	10
3.4 Clasificación de las RDAP según su rendimiento hidráulico.....	11
3.4.1 Confiabilidad	11
3.4.2 Tolerancia a fallos.....	12
4. Desarrollo demográfico de las ciudades de Colombia	13
4.1 Demografía de Colombia.....	14
4.1.1 Población	14
4.1.2 Variación de la población en las principales ciudades de Colombia	17
4.1.3 Densidad de la población en Colombia	19
5. Desarrollo de las RDAP en Colombia.....	19
5.1 Bogotá	19
5.1.1 Sistemas de Captación de Agua	20
5.1.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)	21
5.2 Cali.....	23
5.2.1 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)	24
5.3 Manizales	26

5.3.1 Sistemas de captación de agua	26
5.3.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)	26
5.4 Cartagena	29
5.4.1 Sistemas de captación de agua potable.....	30
5.4.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)	30
6. Analisis del desarrollo de la RDAP en Colombia.....	33
6.1 Aplicación de los indicadores de evaluación a las redes.....	36
6.1.1 Bogotá	36
6.1.2 Cali.....	51
6.1.3 Manizales	67
6.1.4 Cartagena	98
6.2 Análisis de Resultados	104
6.2.1 Bogotá	104
6.2.2 Cali.....	107
6.2.3 Manizales	110
6.2.4 Cartagena	115
7. Discusión sobre los resultados	117
8. Conclusiones y Recomendaciones	119
9. Bibliografía	120
10. Anexos.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variación de la población en Colombia entre 1951 y 1964	17
Figura 2 Variación de la población en Colombia entre 1964 y 1973	17
Figura 3 Variación de la población en Colombia entre 1973 y 1985	18
Figura 4 Variación de la población en Colombia entre 1985 y 1993	18
Figura 5 Variación de la población en Colombia entre 1993 y 2005	18
Figura 6 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Bogotá desde 1940 hasta 199	23
Figura 7 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Cali desde 1940 hasta 1990.....	26
Figura 8 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Manizales desde 1930 hasta el 2000.....	29
Figura 9 Sectorización hidráulica de la ciudad de Cartagena	29
Figura 10 Desarrollo histórico de la RDAP de la ciudad de Cartagena desde 1938 hasta el 2000	32
Figura 11 Zonificación Operacional de Bogotá.....	36
Figura 12 Ubicación Sector Hidráulico 18.....	37
Figura 13 Ubicación Indicadores Geométricos Sector 18.....	40
Figura 14 Ubicación Sector 25	44
Figura 15 Ubicación Indicadores Geométricos Sector 25.....	49
Figura 16 Red Distribución de Agua Potable de Santiago de Cali.....	52
Figura 17 Ubicación Sector RBS-19.....	53
Figura 18 Ubicación Indicadores Geométricos RBS-19.....	57
Figura 19 Ubicación RBS-22.....	61
Figura 20 Ubicación Indicadores Geométricos RBS-22.....	64
Figura 21 Ubicación del Bajo Rosales	67
Figura 22 Ubicación de los Indicadores Geométricos Bajo Rosales	69
Figura 23 Ubicación Sector Circuito 51.....	73
Figura 24 Ubicación de los Indicadores Geométricos Circuito 51	76
Figura 25 Ubicación del sector Derivación Cond. El Cable-Fu	79
Figura 26 Ubicación de los Indicadores Geométricos Derivación	83
Figura 27 Ubicación Cable Salida de 8.....	86
Figura 28 Ubicación Indicadores Geométricos El Cable Salida de 8	88

Figura 29 Ubicación Sector T9-Belen.....	91
Figura 30 Ubicación de los Indicadores Geométricos T9 Belén.....	95
Figura 31 Ubicación del Sector Lomas.....	98
Figura 32 Ubicación de los Indicadores Geométricos Las Lomas	101

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Población en Colombia.....	14
Gráfica 2 Población en Bogotá	15
Gráfica 3 Población en Cartagena	15
Gráfica 4 Población en Barranquilla	16
Gráfica 5 Población en Bucaramanga.....	16
Gráfica 6 Población en Medellín.....	16
Gráfica 7 Población en Cali	16
Gráfica 8 Población en Manizales.....	17
Gráfica 21 Número total de Suscriptores	38
Gráfica 22 Número de Suscriptores en el Sector 18.....	38
Gráfica 24 Índice de Resiliencia	43
Gráfica 25 Índice de Resiliencia Modificado.....	43
Gráfica 26 Índice de Potencia Especifica	43
Gráfica 27 Entropía.....	43
Gráfica 29 Número total de Suscriptores	45
Gráfica 30 Número de Suscriptores	45
Gráfica 32 Índice de Resiliencia	51
Gráfica 33 Índice de Resiliencia Modificada.....	51
Gráfica 34 Índice de Potencia Especifica	51
Gráfica 35 Entropía.....	51
Gráfica 38 Número total de Suscriptores	54
Gráfica 39 Número de Suscriptores	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Número de habitantes en Colombia en los últimos 6 censos.....	14
Tabla 2 Número de habitantes en las principales ciudades de Colombia en los últimos 6 censos (DANE, 2011)	15
Tabla 3 Sistemas de captación de agua de Bogotá (Aldana & López, 2017)	20
Tabla 4 Plantas de Tratamiento de Agua Potable en Bogotá(Aldana & López, 2017).....	21
Tabla 5 Factores de Multiplicación.....	38
Tabla 6 Indicadores Geométricos Sector 18.....	39
Tabla 7 <i>D</i>	41
Tabla 8 Indicadores de Teoría de Grafos.....	41
Tabla 9 Branch Index	42
Tabla 10 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Sector 18	42
Tabla 11 Factores de Multiplicación.....	46
Tabla 12 Indicadores Geométricos Sector 25.....	46
Tabla 13 <i>D</i>	49
Tabla 14 Indicadores de Teoría de Grafos.....	50
Tabla 15 Branch Index	50
Tabla 16 Indicadores de Rendimiento Hidráulico	51
Tabla 17 Factores de Multiplicación.....	54
Tabla 18 Indicadores Geométricos RBS-19.....	55
Tabla 19 <i>D</i>	58
Tabla 20 Indicadores de Teoría de Grafos RBS-19.....	58
Tabla 21 Branch Index	59
Tabla 22 Indicadores de Rendimiento Hidráulico RBS-19	60
Tabla 23 Factores de Multiplicación.....	63
Tabla 24 Indicadores Geométricos RBS-22.....	63
Tabla 25 <i>D</i>	65
Tabla 26 Indicadores de Teoría de Grafos.....	65
Tabla 27 Branch Index	65

Tabla 28 Indicadores de Rendimiento Hidráulico RBS-22	66
Tabla 29 Factor de Multiplicación	68
Tabla 30 Indicadores Geométricos Bajo Rosales	69
Tabla 31 <i>D</i>	70
Tabla 32 Indicadores de Teoría de Grafos Bajo Rosales	70
Tabla 33 Branch Index	70
Tabla 34 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Bajo Rosales	71
Tabla 35 Factor de Multiplicación	74
Tabla 36 Indicadores Geométricos Circuito 51.....	74
Tabla 37 <i>D</i>	76
Tabla 38 Indicadores de Teoría de Grafos Circuito 51.....	77
Tabla 39 Branch Index	77
Tabla 40 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Circuito 51	77
Tabla 41 Factor de Multiplicación	81
Tabla 42 Indicadores Geométricos Derivación	82
Tabla 43 <i>D</i>	84
Tabla 44 Indicadores de Teoría de Grafos	84
Tabla 45 Branch Index	84
Tabla 46 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Derivación	85
Tabla 47 Factor de Multiplicación	87
Tabla 48 Indicadores Geométricos El Cable Salida de 8	87
Tabla 49 <i>D</i>	89
Tabla 50 Indicadores de Teoría de Grafos El Cable Salida de 8	89
Tabla 51 Branch Index	89
Tabla 52 Indicadores de Rendimiento Hidráulico El Cable Salida de 8.....	90
Tabla 53 Factor de Multiplicación	93
Tabla 54 <i>D</i>	95
Tabla 55 Indicadores de Teoría de Grafos T9-Belen.....	96
Tabla 56 Branch Index	96
Tabla 57 Indicadores de Rendimiento Hidráulico	96

Tabla 58 Factores de Multiplicación	99
Tabla 59 Indicadores Geométricos Las Lomas.....	100
Tabla 60 <i>D</i>	102
Tabla 61 Indicadores de Teoría de Grafos Las Lomas.....	102
Tabla 62 Branch Index	102
Tabla 63 Indicadores e Rendimiento Hidráulico Las Lomas	103

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Volumen Centroid	3
Ecuación 2 Specific Power Centrid	3
Ecuación 3 Potencia específica de la tubería.....	3
Ecuación 4 Diameter Centroid.....	4
Ecuación 5 Power Centroid	4
Ecuación 6 Centroid en el eje x de la tubería i	4
Ecuación 7 Centroid en el eje y de la tubería i	4
Ecuación 8 Length-weighted average pipe diameter.....	5
Ecuación 9 Link Density	6
Ecuación 10 Average Node Degree	7
Ecuación 11 Meshedness Coefficient	7
Ecuación 12 Diameter	7
Ecuación 13 Average path length.....	8
Ecuación 14 Betweenness	8
Ecuación 15 Central point dominance.....	9
Ecuación 16 Closeness.....	9
Ecuación 17 Heterogeneity	9
Ecuación 18 Assortativity	9
Ecuación 19 Branch Index.....	10
Ecuación 20 Entropía.....	11
Ecuación 21 Índice de resiliencia.....	12
Ecuación 22 Índice de resiliencia modificado.....	13
Ecuación 23 Potencia específica.....	13
Ecuación 24 Método Aritmético.....	33
Ecuación 25 Método Geométrico.....	34
Ecuación 26 Método Exponencial	34
Ecuación 27	35
Ecuación 28	35

1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades son estructuras altamente dinámicas, las cuales experimentan entre otros, grandes cambios demográficos y geográficos a lo largo del tiempo, debido al desarrollo económico, cultural, social y político que se da en la zona. Estos cambios suelen generar incertidumbre acerca de la adaptación de la infraestructura vial, y las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) (Moreno, Rojas, & Saldarriaga, 2018). La RDAP es uno de los sistemas más importantes de una ciudad, y es esencial que funcione de manera adecuada (Zischg, Rauch, & Sitzenfrei, 2018), ya que la provisión segura de agua potable es vital para la sociedad y la economía. (Meng, Fu, Farmani, Sweetapple, & Butler, 2018).

Los cambios en la estructura de las RDAP están relacionados con factores como el cambio en el patrón de demanda, el Cambio Climático, aumento o disminución de la población y la variación en el uso del suelo. Las modificaciones en la red son procesos a largo plazo, los cuales se deben realizar paso a paso en diferentes fases, lo anterior con el fin de lograr un crecimiento gradual de esta, sin afectar en mayor medida al servicio de suministro de agua potable (Creaco, Franchini, Walski, & Asce, 2015). La mayoría de estos, consisten en realizar expansiones a la red y generalmente se basan en la necesidad de centralizar o descentralizar alguna zona de la ciudad.

Durante la transición, la estructura de la red y su función irán cambiando progresivamente, y se presentarán eventos como la suspensión del servicio en algunas zonas de la ciudad por causa de la pérdida de conectividad, el cambio de la demanda y el reordenamiento de flujo (Zischg et al., 2018). Para evitar un suministro insuficiente de agua a la población, debido al estrés que sufre el sistema en este tipo de transiciones, algunos autores recomiendan planificar la expansión o modificación que se desee implementar en la red con base a él plan maestro de la ciudad. El plan maestro de una ciudad generalmente define los cambios regulatorios y propone una guía a seguir respecto al desarrollo futuro de esta. Establece objetivos integrales de paisaje urbano, manejo de los recursos hídricos, entre otros (Zischg et al., 2018). Con respecto a los recursos hídricos, un plan maestro debe precisar la necesidad de centralizado o descentralizado, la gestión del agua en el futuro, la densificación esperada de la ciudad, expansión de barrios, etc.

Sin embargo, las ciudades modernas experimentan patrones de crecimientos rápidos y por lo general son resultado de un proceso de construcción descentralizados, los cuales no se basan en ninguna planificación previa (Planes Maestros) (Buhl et al., 2006), causando así que el análisis y la gestión de la infraestructura de las ciudades, en este caso las RDAP sea una tarea difícil (Giustolisi, Simone, & Ridolfi, 2017). Muchas de estas redes evolucionan de manera incremental a través de un proceso físico, el cual involucra reglas de agregación local. Por ejemplo, en la actualidad en los países en desarrollo se presenta un crecimiento exponencial de los principales centros urbanos, además de un crecimiento simultáneo de barrios

marginales y asentamientos ilegales, causando así que en muchos de los casos las topologías resultantes de la red sea complejas y se desvíe de patrones regulares simples como las cuadrículas de nodos enlazados.(Buhl et al., 2006).

Toda esta falta de interés ante la adecuada planeación del desarrollo de las RDAP en la ciudades se debe a que, durante el siglo pasado la tarea principal de las compañías de acueducto era únicamente la construcción de las RDAP, con el fin de lograr entregar agua potable a cada uno de los clientes que necesitara del servicio, pero esto ha venido cambiando con él tiempo, debido a factores como el envejecimiento del sistema, a los cambios demográficos y territoriales de la ciudades y al aumento de la sensibilidad del cliente ante la calidad del servicio prestado (Giustolisi, Ridolfi, & Simone, 2019), generando así, una necesidad de tener en cuenta dentro del análisis y la gestión de las RDAP los conceptos de confiabilidad, vulnerabilidad, seguridad, entre otros, los cuales están altamente relacionados con aspectos socio económicos y ambientales de las ciudades (Giustolisi et al., 2017).

El crecimiento de las ciudades de los países en desarrollo brinda la oportunidad de mejorar criterios funcionales, geométricos, topológicos y de rendimiento hidráulico de la red. Para evaluar estos criterios es necesario definir una amplia gamas de mediciones, las cuales hacen parte de la teoría de grafos, para estudiar los componentes estructurales básicos del sistema, como la redundancia y la conectividad optima, y cuantificar propiedades hidráulicas como la confiabilidad y la tolerancia a las fallas de la red (Yazdani, Otoo, & Jeffrey, 2011).

Colombia, al ser considerado un país en desarrollo, es el escenario perfecto para identificar cuáles son los criterios en los que se basa el desarrollo demográfico y de estructuras como la RDAP de las ciudades que conforman el país. En esta tesis se realizará un análisis cualitativo y cuantitativo de las características geométricas, topológicas, funcionales e hidráulicas de RDAP de 4 ciudades representativas del país y se identificaran como han mejorado estas características a lo largo de los últimos 60 años.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar el desarrollo histórico de las RDAP en diferentes ciudades de Colombia a partir de su rendimiento hidráulico y características topológicas.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las métricas propuestas en la literatura que caracterizan las RDAP.
- Recolectar y Analizar la información demográfica y geográfica de las principales ciudades de Colombia para conocer el desarrollo de dichas características en el tiempo.
- Recolectar y Analizar la información de las RDAP de las principales ciudades de Colombia, para conocer el desarrollo de las redes en el tiempo.

- Evaluar el desarrollo de las RDAP en las principales ciudades de Colombia a partir de indicadores geométricos, topológicos e hidráulicos que se ajusten a sus características.

3. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICAS, TOPOLÓGICAS E HIDRÁULICAS DE LAS RDAP

Para llevar a cabo el análisis del desarrollo de las Redes de Distribución de Agua Potable es fundamental, en primer lugar, realizar una investigación exhaustiva de las diferentes metodologías de clasificación de las redes usadas por diferentes autores, desde el punto de vista geométrico, funcional, topológico y de rendimiento hidráulico.

3.1 Clasificación de las RDAP según su geometría

Se propusieron 4 indicadores geométricos, los cuales evalúan los atributos geométricos de una RDAP. Para calcular estos índices es necesario contar con las coordenadas X e Y de cada par de nodos que limita cada sección de n tuberías que componen el sistema (Moreno et al., 2018) .

3.1.1 Índices geométricos

- Volumen Centroid (C_v):

$$C_v = \frac{\sum_{i=1}^{nt} V_i * D_{ist i}}{V_T} \quad (\text{Moreno et al., 2018})$$

Ecuación 1 Volumen Centroid

Donde,

$V_i = \text{Volumen del tubo } i$

$V_T = \text{Volumen total}$

- Specific Power Centroid (CP_s):

$$CP_s = \frac{\sum_{i=1}^{nt} P_{Si} * D_{ist i}}{P_{ST}} \quad (\text{Moreno et al., 2018})$$

Ecuación 2 Specific Power Centrid

$$P_{Si} = q_i (h_{i,ini} - h_{i,fin})$$

Ecuación 3 Potencia específica de la tubería

Donde,

$P_{Si} = \text{Potencia específica de la tubería } i$

$q_i = \text{Caudal en la tubería } i$

$h_{i,ini}, h_{i,fin} = \text{Alturas piezométricas en el nodo inicial y en el nodo final de la tubería } i$

$P_{ST} = \text{Potencia específica total}$

- Diameter Centroid (C_d):

$$C_d = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} d_i * D_{ist\ i}}{\sum_{i=1}^{n_t} d_i} \quad (\text{Moreno et al., 2018})$$

Ecuación 4 Diameter Centroid

Donde,

$d_i =$ diametro de la tubería i

- Power Centroid (C_p):

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i * D_{ist\ i}}{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i} \quad (\text{Moreno et al., 2018})$$

Ecuación 5 Power Centroid

Donde,

$Q_D =$ Caudal demandado en el nodo i

$h_i =$ Altura piezometrica en el nodo i

Desde la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5 el termino $D_{ist\ i}$ se refiere al centroide de la tubería i y se calcula a partir de las ecuaciones Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$D_{ist\ (x_i)} = \frac{|C_{x_{ini}} - C_{x_{fin}}|}{2} + \min(C_{x_{ini}}, C_{x_{fin}}) \quad (\text{Moreno et al., 2018})$$

Ecuación 6 Centroide en el eje x de la tubería i

$$D_{ist\ (y_i)} = \frac{|C_{y_{ini}} - C_{y_{fin}}|}{2} + \min(C_{y_{ini}}, C_{y_{fin}})$$

Ecuación 7 Centroide en el eje y de la tubería i

$C_{x_{ini}}, C_{x_{fin}}, C_{y_{ini}}, C_{y_{fin}}$ son las coordenadas del nodo inicial y final de la tubería

Don
de,

3.2 Clasificación de las RDAP según su función

En términos de función las RDAP, se pueden clasificar en dos grupos, el primero se denomina sistema de transmisión y el segundo sistema de distribución. Las tuberías de transmisión son análogas a las autopistas, con pocas salidas, mientras que las tuberías de distribución son similares a las carreteras más pequeñas, con desvíos a las casas y edificios. Las redes de transmisión a menudo están conformadas por redes de una sola serie o circuitos grandes y su función es transportar grandes cantidades de agua desde la fuente hasta la planta de tratamiento y desde la planta al sistema de distribución, mientras que los sistemas de distribución generalmente se componen de una red compleja de tuberías altamente interconectadas (Hwang & Lansey, 2017).

Para realizar una correcta clasificación de las tuberías de una red en base a su función, es necesario contar con los planes detallados de la red, donde sea posible verificar si las tuberías están conectadas a medidores individuales. Si lo están, la función de estas tuberías sería distribuir mas no transmitir (Hwang & Lansey, 2017).

Debido a que no se cuenta con la información necesaria para identificar la conexión de las tuberías a medidores individuales, la clasificación de las redes escogidas como casos de estudio se realizara a partir del indicador propuesto por lo autores Hwang y Lansey.

3.2.1 Índice de funcionalidad

Se propuso como indicador de funcionalidad el “*Length-weighted average pipe diameter*” (\bar{D}) (Hwang et al., 2017):

$$\bar{D} = \frac{\sum_{k=1}^m D_k L_k}{\sum_{k=1}^m L_k} \quad (\text{Hwang \& Lansey, 2017})$$

Ecuación 8 *Length-weighted average pipe diameter*

Donde,

$$\begin{aligned} D_k &= \text{Diametro de la tubería} \\ L_k &= \text{Longitud de la tubería} \\ m &= \text{numero de tuberías en la RDAP} \end{aligned}$$

Si \bar{D} es igual o mayor a 305 mm (12 in), la red es un sistema de transmisión mientras que si \bar{D} es menor a 305 mm (12 in), la red es un sistema de distribución.

3.3 Clasificación de las RDAP según su topología

La Teoría de Redes Complejas se está convirtiendo en una de las herramientas más poderosas para describir el mundo, las redes permiten el estudio y la interpretación de una gran cantidad de procesos físicos, biológicos y sociales. Mediante esta metodología es posible describir tanto

características topológicas como estructurales de las redes y a pesar de que cada una tenga propiedades diferentes pueden llegar a compartir características similares (Giustolisi et al., 2017)

3.3.1 Teoría de Grafos

Una Red de Distribución de Agua Potable se representa por medio de un grafo no dirigido $G(N, E)$, definido por un conjunto N de n nodos y un conjunto E de e enlaces no direccionados. Los nodos representan elementos de la red, como tanques y depósitos, mientras que los enlaces hacen referencia a las tuberías, bombas, válvulas entre otros accesorios (Hwang & Lansey, 2017).

A partir de la Teoría de Grafos es posible caracterizar las RDAP con propiedades topológicas, como la conectividad, la eficiencia, la centralidad, la diversidad, la robustez y el modularidad. Estos atributos son conceptos matemáticos y por lo tanto no deben confundirse con las definiciones hidráulicas. Por ejemplo, la eficiencia hace referencia a que tan eficiente es el intercambio de información en una red y no a la eficiencia energética para el transporte de agua en una tubería, y la robustez a la capacidad del sistema para soportar los efectos que causa en la red el eliminar nodos y enlaces de esta. (Meng et al., 2018).

Cada uno de los atributos se evalúa utilizando uno o varias métricas relacionadas con la teoría de grafos, cada uno de los indicadores de evaluación serán descritos desde el numeral 3.3.1.1 hasta el numeral 3.3.1.5.

3.3.1.1 Índices Topológicos relacionados con la conectividad de la red

- Link Density (q): Describe la proporción de conexiones reales a potenciales en una red (Hwang & Lansey, 2017).

$$q = \frac{2e}{n(n-1)} \quad (\text{Yazdani et al., 2011})$$

Ecuación 9 Link Density

Donde,

$e = \text{numero de enlaces}$

$n = \text{numero de nodos}$

Entre más alto sea el valor de q más interconectada esta la red, su magnitud puede variar al cambiar el tamaño de la red. El aspecto más importante de la conectividad es que todos los nodos o enlaces en la red deberían permanecer conectados a una fuente de suministro de agua (Yazdani et al., 2011)

- Average Node Degree (\bar{k}): Indica el número de enlaces a un nodo.

$$\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \frac{2e}{n} \quad (\text{Yazdani et al., 2011})$$

Ecuación 10 Average Node Degree

Donde,

$$ND_i = \text{grado del nodo en el nodo } i.$$

Una red con un valor alto de *AND* demuestra una redundancia alta en la red, puesto que, el agua puede llegar a un mismo nodo desde diferentes caminos.

Otra medida básica de conectividad es la distribución del grado nodal, esta métrica describe la distribución de probabilidad del número de bordes conectados con cada nodo de la red (Giustolisi et al., 2017). Tanto el “Average Node Degree” como la distribución del grado nodal, reflejan la similitud topológica general de la red con las estructuras en forma de celosía, esta clase de estructuras son importantes para garantizar una distribución equitativa del flujo y de la presión bajo diferentes demandas (Yazdani et al., 2011).

- Meshedness Coefficient (*MC*): Mide la conectividad de la red mediante la evaluación del número de circuitos en comparación con el número máximo potencial de circuitos.

$$MC = \frac{e - n + 1}{2n - 5} \quad (\text{Buhl et al., 2006})$$

Ecuación 11 Meshedness Coefficient

El valor de *MC* puede variar de 0, es decir la red se caracteriza como una estructura de árbol, a 1, lo cual quiere decir que la estructura de la red es más parecida a una estructura de maya (Buhl et al., 2006).

3.3.1.2 Índices Topológicos relacionados con la eficiencia de la red

- Diameter o the longest shortest path (d_T): Proporciona una medida básica de la extensión topológica y geográfica de la red. Se define como la distancia máxima entre cualquier par de nodos en la red.

$$d_T = \max\{d(v_i, v_j) : \forall v_i \in V\} \quad (\text{Yazdani et al., 2011})$$

Ecuación 12 Diameter

Donde,

$$\{d(v_i, v_j)\} = \text{la distancia geodesica mas corta entre cada par de nodos.}$$

- Average path length (l_T): Calcula el número promedio de enlaces que se deben atravesar para llegar de un punto a otro.

$$l_T = \frac{1}{n(n-1)} \times \sum_{i,j=1}^n d(v_i, v_j) \quad (\text{Yazdani et al., 2011})$$

Ecuación 13 Average path length

3.3.1.3 Índices Topológicos relacionados con la centralidad de la red

La centralidad está definida por métricas que cuantifican la importancia de los vértices de una red desde diferentes puntos de vista, básicamente para evaluar la confiabilidad y vulnerabilidad del sistema (Giustolisi et al., 2019). Las métricas que más se ajustan a las RDAP son:

- Betweenness (C_i^B): El “Betweenness centrality” cuantifica la importancia de un vértice para la comunicación dentro de la red, es decir el número de rutas más cortas que pasan a través de cada uno de los vértices (Giustolisi et al., 2019).

$$C_i^B = \sum_{s \neq i \neq t \in V} \frac{\sigma_{s,t}(i)}{\sigma_{s,t}} \quad (\text{Freeman, 1977})$$

Ecuación 14 Betweenness

Donde,

$\sigma_{s,t}(i)$ = Es el número de caminos geodesicos mas cortos que hay entre s y t .

$\sigma_{s,t}$ = Es el número de caminos geodesicos mas cortos que pasan por el nodo i .

La importancia de este indicador de centralidad es que, el nodo con un valor mayor de C_i^B es el punto potencial, para el control del flujo de información en la red, es decir que este punto puede facilitar, impedir o sesgar la transmisión de la información (Freeman, 1977).

- Central point dominance (C_B): Se puede considerar como un cuantificador a gran escala de la vulnerabilidad de la red frente a fallas que pueden ocurrir alrededor de una ubicación central. Este indicador se calcula con base a el “betweenness centrality” de cada nodo. En otras palabras, es la diferencia promedio entre el “betweenness centrality” del nodo más central de la red (B_{max}) y el “betweenness centrality” (B_i) de los demás nodos (Yazdani et al., 2011).

$$C_B = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (B_{max} - B_i) \quad (\text{Freeman, 1977})$$

Ecuación 15 Central point dominance

- Closeness (C_i^C): *Mide la eficiencia de difusión de información del nodo* (Giustolisi et al., 2019).

$$C_i^C = \frac{1}{\sum_j d_{ij}} \quad (\text{Freeman, 1977})$$

Ecuación 16 Closeness

3.3.1.4 Índices Topológicos relacionados con la diversidad de la red

Muchas de las redes, que se estudian en la naturales muestran diferentes combinaciones en los grados de los nodos que las componen, en algunas ocasiones existe una preferencia por unir los nodos de más alto grado nodal entre sí, mientras que otras veces se muestra una mezcla desorientada entre los nodos, es decir la unión de nodos con un alto grado nodal, con nodos con un grado nodal más bajo (Newman, 2002). Al medir la diversidad en los nodos de una red es posible identificar que tan robusta es esta, ante eventos de desconexión de los nodos con un grado nodal más alto.

En esta investigación, se estudiarán 2 métricas de diversidad:

- Heterogeneity: Coeficiente de varianza en el grado nodal (\bar{k} es el Average nodal degree del grafo).

$$h = \frac{1}{\bar{k}} \times \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2 \quad (\text{Yazdani et al., 2011})$$

Ecuación 17 Heterogeneity

- Assortativity Coefficient (Γ):

$$\Gamma = \frac{c \sum_i j_i k_i - \left[c \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}{c \sum_i \frac{1}{2} (j_i^2 + k_i^2) - \left[c \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2} \quad (\text{Newman, 2002})$$

Ecuación 18 Assortativity

$$c = \frac{1}{m}$$

j_i y k_i = grado de los nodos inicial y final del el enlace i .
 m = numero de enlaces.

Si $\Gamma > 0$ indica que la red es asortativa, es decir los nodos están conectados a nodos que tiene un grado nodal similar, mientras que si $\Gamma < 0$ la red se clasifica como una red disortativa, es decir que los nodos están conectados a nodos con grados nodales diferentes(Buhl et al., 2006).

3.3.1.5 Índices Topológicos relacionados con la robustez de la red

Además de estudiar la eficiencia asociada a la topología de la red, un atributo complementario a la clasificación y caracterización de las RDAP es el análisis de fragilidad de la red frente a fallos aleatorios. La robustez de una red se mide estudiando cómo se fragmenta esta, a medida que se elimina una fracción creciente de nodos (Buhl et al., 2006). La robustez cuantifica la susceptibilidad de una estructura de red al daño mediante el uso de propiedades gráficas(Yazdani et al., 2011). Una de las métricas usadas para este fin es(Estrada, 2006):

- Spectral Gap ($\Delta\lambda$): Este indicador tiene como propósito, identificar si la red tiene buenas propiedades de expansión. Está definido como la diferencia entre el primero y segundo valor propio de la matriz de adyacencia del grafo(Estrada, 2006).

3.3.2 Branch Index (BI)

Según su topología una RDAP se puede clasificar como una red ramificada (Branch) o como una red cuadriculada (Grid) (Hwang & Lansey, 2017). Debido a que ninguno de los indicadores propuestos por la teoría de grafos logra caracterizar la red en las dos características mencionadas anteriormente, (Hwang & Lansey, 2017) planteo el “Branch Index”, el cual se define como la relación entre los enlaces ramificados con respecto al número de enlaces ramificados más el número de enlaces de la red reducida.

$$BI = \frac{e_b}{e_r + e_b} \quad (\text{Hwang \& Lansey, 2017})$$

Ecuación 19 Branch Index

Donde,

$$e_b = \text{numero de enlaces ramificados}$$
$$e_r = \text{numero de enlaces en la red reducida}$$

Si $BI \geq 0.5$ la RDAP es un sistema ramificado, de lo contrario es un sistema con circuitos.

3.4 Clasificación de las RDAP según su rendimiento hidráulico

Las Redes de Distribución de Agua Potable están compuesta por múltiples elementos interconectados, el fallo individual o conjunto de estos, puede causar la interrupción del servicio de agua, por esta razón es fundamental mejorar la confiabilidad del sistema y la capacidad de respuesta de este ante cualquier evento de falla. Las fallas en las RDAP se dividen principalmente en dos tipos, falla mecánica de los componentes del sistema, y fallas hidráulicas para satisfacer la demanda de los consumidores (Yazdani et al., 2011).

Las medias de rendimiento hidráulico que se estudiarán en este documento son la confiabilidad y la tolerancia a fallos.

3.4.1 Confiabilidad

La confiabilidad de un sistema de distribución de agua generalmente se define como la probabilidad de no falla mecánica o hidráulica durante un período de tiempo determinado, en condiciones de operación normales (Yazdani et al., 2011).

3.4.1.1 Entropía

La Entropía está asociada a la incertidumbre que caracteriza las rutas que llevan agua a cada nodo de la red. Un alto valor de entropía implica la existencia de muchos caminos de alimentación igualmente importantes y garantiza que el nodo se suministre correctamente incluso si una de las rutas esta temporalmente fuera de servicio debido a trabajos de mantenimiento (Creaco, Fortunato, Franchini, & Mazzola, 2014).

En comparación con otros criterios esta medida tiene la ventaja de que es relativamente fácil de calcular, no es un cálculo iterativo y los requisitos de datos son mínimos (Tanyimboh, 2017).

$$E = \underbrace{- \sum_{k=1}^s \frac{Q_{ok}}{T} \ln \left(\frac{Q_{ok}}{T} \right)}_{E-\text{Fuentes de abastecimiento}} - \underbrace{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{T} \ln \left(\frac{d_i}{T_i} \right) - \sum_{ij \in ND_i} \frac{Q_{ij}}{T} \ln \left(\frac{Q_{ij}}{T_i} \right)}_{E-\text{nodos}} \quad (\text{Creaco et al., 2014})$$

Ecuación 20 Entropía

Donde,

Q_{ok} = Caudal de entrada desde la fuente de abastecimiento

T = Suma de las demandas de los nodos de la red

T_i = Caudal total que llega al nodo i

d_i = Demanda en el nodo i

Q_{ij} = Caudal desde el nodo i al nodo j

N = Numero total de nodos

$s =$ Numero total de fuentes de suministro

3.4.2 Tolerancia a fallos

La capacidad del sistema para satisfacer las demandas de presión adecuada cuando uno o más componentes no están en servicio (Tanyimboh, Siew, & Saleh, 2016).

3.4.2.1 Resiliencia

La resiliencia es un parámetro importante a la hora de evaluar el rendimiento hidráulico del diseño de una red puesto que este parámetro determina la capacidad que tiene un sistema para adaptarse y recuperarse rápidamente ante fallas potenciales ante un futuro incierto e impredecible (Meng et al., 2018).

3.4.2.1.1 Índices de resiliencia

- Resilience Index (*RI*): El índice de resiliencia relaciona la capacidad de respuesta del sistema ante una falla y la cantidad de energía que disipa. Si la energía disipada es menor, la red es más resiliente ya que la cantidad de energía residual en el sistema es mayor (Moreno et al., 2018).

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{k=1}^{n_r} D_{out_k} H_k + \sum_{j=1}^{m_p} P_j / \gamma - \sum_{i=1}^{n_n} D_i l} \quad (\text{Todini, E, 2000})$$

Ecuación 21 Índice de resiliencia

Donde,

- $D_i =$ Demanda en el nodo i
- $H_i =$ Altura de presión en el nodo i
- $H_i^{(req)} =$ Altura de presión requerida en el nodo i
- $D_{out_k} =$ Caudal total suministrado por el tanque k
- $H_k =$ Altura de presión en el tanque k
- $P_j =$ Potencia de la bomba j
- $\gamma =$ Peso específico del agua
- $n_n =$ número de nodos de demanda
- $n_r =$ número de tanques

El *RI* únicamente puede tomar valores positivos y dentro del intervalo [0,1). El valor del indicador nunca puede ser 1, ya que esto implicaría que toda la energía del sistema se disipó totalmente (Creaco et al., 2014).

- Modified Resilience Index (*MRI*): Se define como la relación entre el excedente de energía disponible en los nodos de demanda y la potencia requerida.

$$MRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{i=1}^{n_n} D_i H_i^{(req)}} \quad (\text{Jayaram, N., Srinivasan, K, 2008})$$

Ecuación 22 Índice de resiliencia modificado

- Specific Power Index (*P_{PC}*): Es una medida de eficiencia de la energía del sistema y representa el porcentaje total de energía disponible que se utiliza para satisfacer la demanda.

$$P_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i (h_i - Z_{min})}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i (H_i - Z_{min})} * 100 \quad (\text{Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero, \& Cortés, 2010})$$

Ecuación 23 Potencia específica

Donde,

Z_{min} = Altura topografica minima de la red.

q_i = Demanda en el nodo i .

H_i = Altura piezometrica en el nodo i .

4. DESARROLLO DEMOGRÁFICO DE LAS CIUDADES DE COLOMBIA

Durante el siglo XX y parte del siglo XXI, en Colombia se han presentado grandes cambios tanto en su configuración regional y urbana como en la dinámica sociodemográfica. Principalmente durante la segunda mitad del siglo XX se empezó a concentrar la mayoría de la población en las áreas urbanas, especialmente en las grandes ciudades, esto debido al continuo desarrollo de las redes de comunicación y transporte y los procesos de industrialización urbana (DANE, 2011).

La transformación en la demografía del país se caracterizó principalmente por la urbanización y la reestructuración regional de ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla, ciudades donde se desarrolla actualmente las actividades económicas más importantes del país (DANE, 2001).

La distribución territorial y espacial de la población colombiana está condicionada por varios factores, algunos de estos es el clima, la calidad de los suelos, los tipos de paisajes y los recursos naturales presentes en la región. Otros factores como la inseguridad y el conflicto

armado han causado el abandono de las áreas rurales y el crecimiento de las áreas urbanas (DANE, 2001).

Bogotá, Cartagena, Cali, Barranquilla, entre otros, son las ciudades con mayor población del país. Es por esto que el centro y el occidente del territorio se consideran densamente poblado a diferencia del oriente de país (DANE, 2001).

4.1 Demografía de Colombia

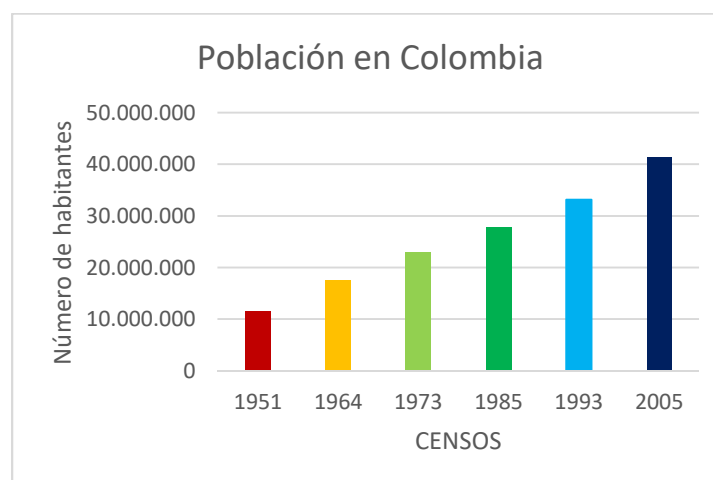
A continuación, se realizará un análisis preliminar, en primer lugar, de la transformación demográfica en Colombia, teniendo en cuenta el número de habitante y porcentaje de crecimiento poblacional, seguidamente por un análisis más detallado de las ciudades más importantes del país como los son Bogotá, Cartagena, Barranquilla, Bucaramanga, Medellín, Cali y Manizales (DANE, 2001). El análisis se llevará a cabo con los datos de población de los censos de 1951, 1964, 1973, 1985, 1993, 2005.

4.1.1 Población

En la Tabla 1 y la Gráfica 1 se presenta el número de habitantes por censo desde 1951 hasta el 2005 en Colombia.

CENSO	1951	1964	1973	1985	1993	2005
Habitantes	11,548,172	17,484,508	22,915,229	27,867,326	33,109,839	41,468,384

Tabla 1 Número de habitantes en Colombia en los últimos 6 censos



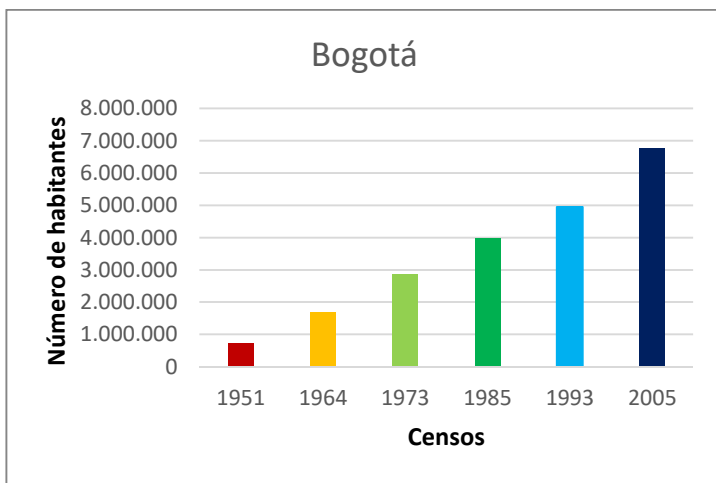
Gráfica 1 Población en Colombia

La población colombiana en los últimos 60 años aproximadamente ha aumentado en un 72,2 %. Se presenta un aumento de la población del 51,4% entre los años 1951 y 1964, siendo este el porcentaje más alto de crecimiento en los últimos años.

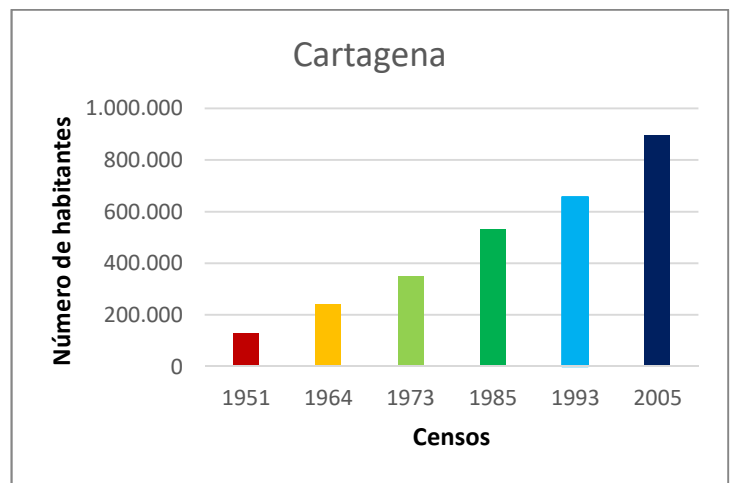
De acuerdo a los resultados publicados por el Departamento Nacional de Estadística -DANE del censo realizado en el año 2005, tres cuartas partes de la población total de Colombia se encontraba ubicada en las cabeceras municipales, el 41,4% se localizaba en Bogotá, Medellín, Barranquilla, Cali y Cartagena. En la Tabla 2 y las Gráfica 2 hasta la Gráfica 8 se muestra el número de habitantes por censo y ciudad.

Ciudad/Censo	1951	1964	1973	1985	1993	2005
Bogotá D.C.	715,250	1,697,311	2,861,913	3,982,941	4,945,448	6,778,691
Cali	284,186	637,929	991,549	1,350,565	1,666,468	2,075,380
Manizales	126,201	221,916	239,140	299,352	327,663	368,433
Cartagena	128,877	242,085	348,961	531,426	656,632	895,400
Medellín	358,189	772,887	1,163,868	1,468,089	1,630,009	2,219,861
Bucaramanga	112,252	229,748	324,873	352,326	414,365	509,918
Barranquilla	279,627	498,301	703,488	899,781	993,759	1,112,889

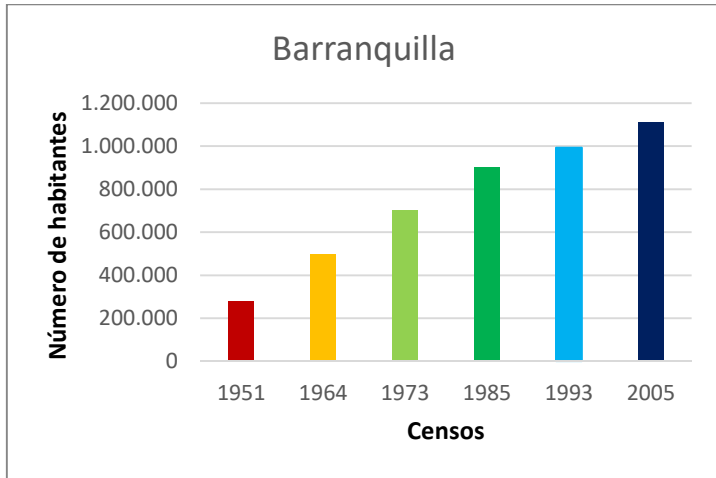
Tabla 2 Número de habitantes en las principales ciudades de Colombia en los últimos 6 censos (DANE, 2011)



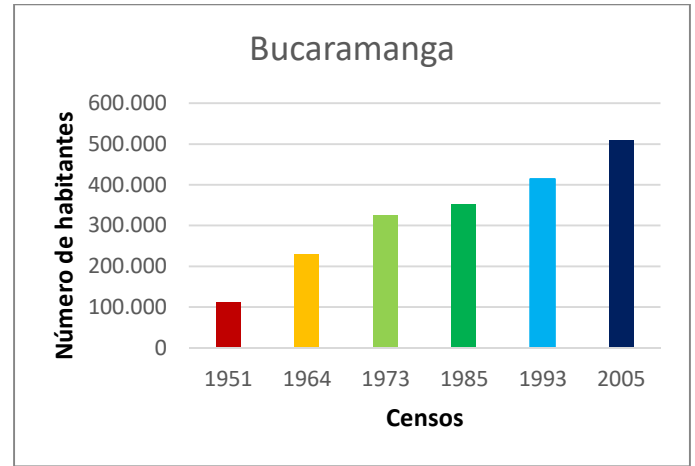
Gráfica 2 Población en Bogotá



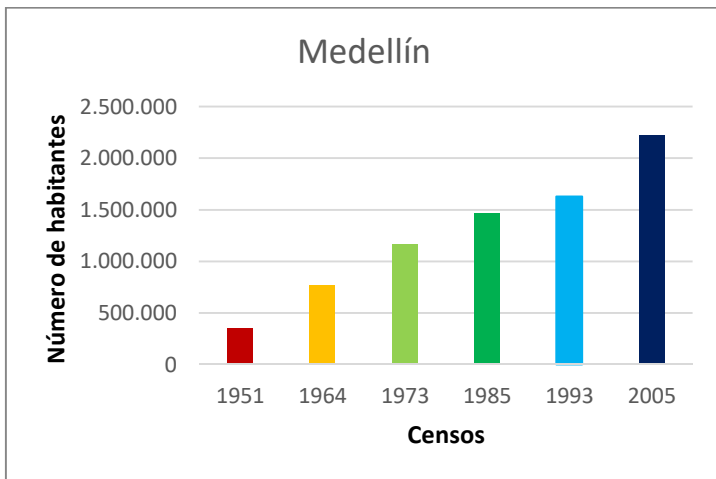
Gráfica 3 Población en Cartagena



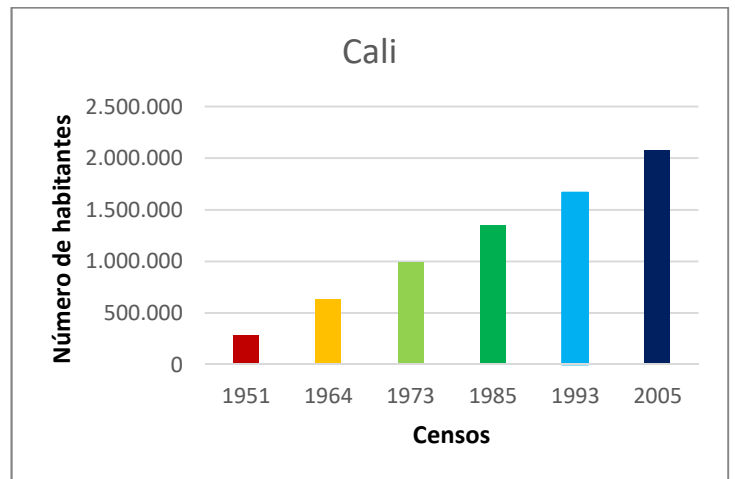
Gráfica 4 Población en Barranquilla



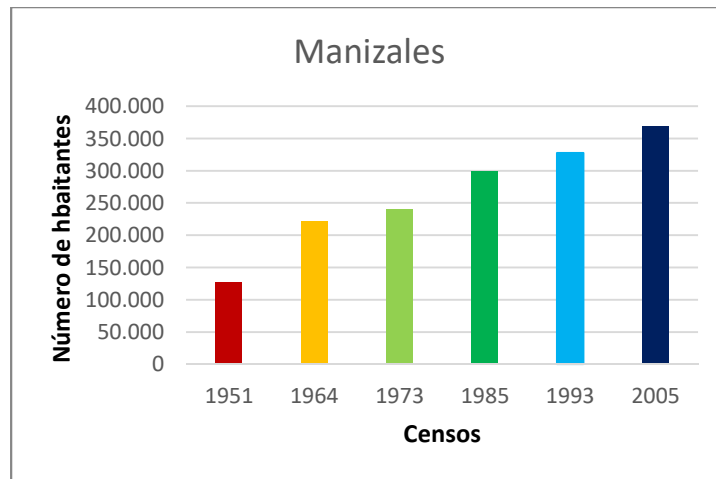
Gráfica 5 Población en Bucaramanga



Gráfica 6 Población en Medellín



Gráfica 7 Población en Cali



Gráfica 8 Población en Manizales

4.1.2 Variación de la población en las principales ciudades de Colombia

Con respecto a las ciudades de Bogotá D.C., Cartagena, Barranquilla, Bucaramanga, Medellín, Cali y Manizales, se puede observar de la Figura 1 hasta la Figura 5 que el mayor crecimiento de la población se presenta entre los años 1952 y 1964 con un aumento de la población en la ciudad de Bogotá D.C de un 137,3%, seguida de Cali con un crecimiento del 124,5%, Medellín (115,8%), Bucaramanga (104,75%), Cartagena (87,8%), Barranquilla (78,25) Y Manizales (75,8%).

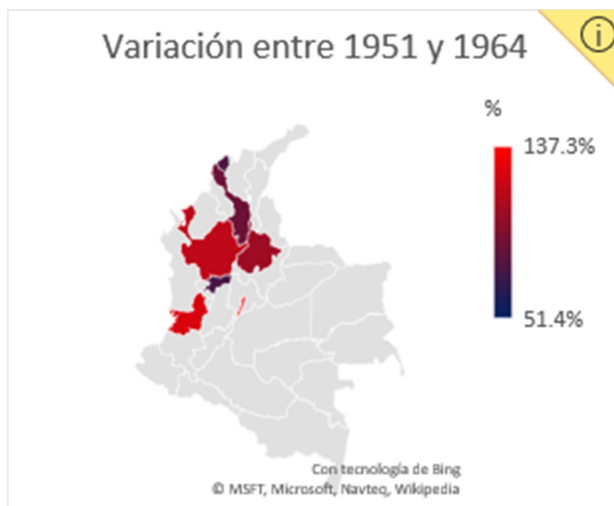


Figura 1 Variación de la población en Colombia entre 1951 y 1964

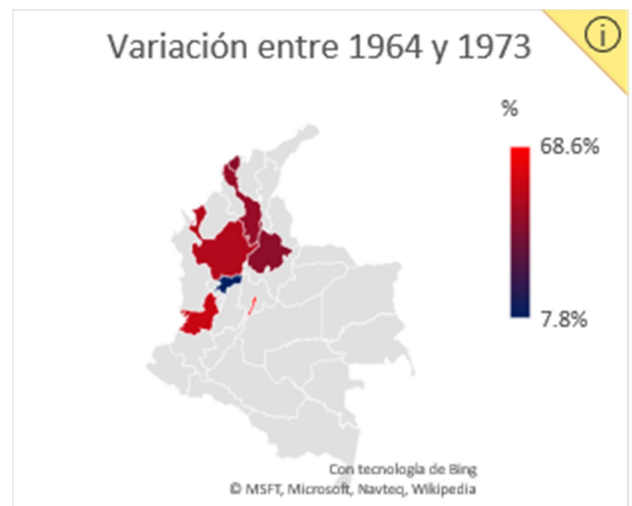


Figura 2 Variación de la población en Colombia entre 1964 y 1973

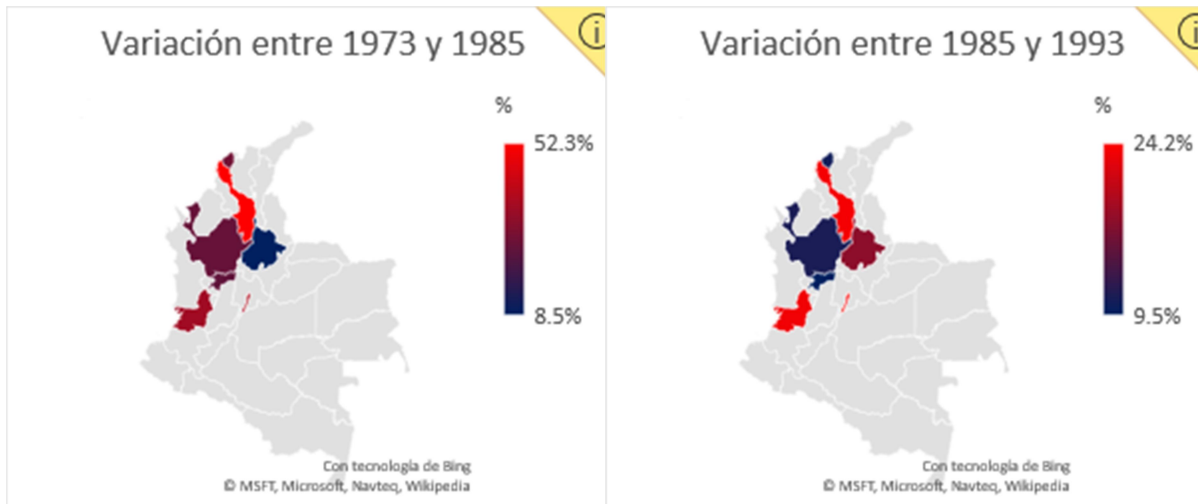


Figura 3 Variación de la población en Colombia entre 1973 y 1985

Figura 4 Variación de la población en Colombia entre 1985 y 1993

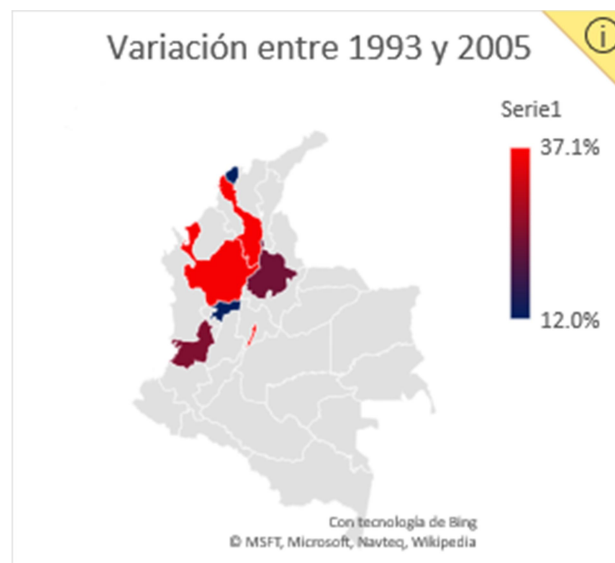


Figura 5 Variación de la población en Colombia entre 1993 y 2005

Según las estadísticas del DANE, la tasa de crecimiento poblacional en el país está en descenso, al pasar de una tasa promedio de 2,02% en el periodo de 1985 al 1993 a una tasa de 1,41% entre los años 1993 y 2005 (DANE, 2011).

El comportamiento del descenso de la tasa promedio de crecimiento poblacional para la mayoría de las ciudades es similar.

4.1.3 Densidad de la población en Colombia

La densidad población de una región es la relación entre la cantidad de población y el área territorial en la que se habita, y esta expresada en (hab./km²). Generalmente la mayor concentración de población se presenta en las costas, llanuras y valles (DANE, 2011).

En el 2005, la densidad poblacional en Colombia era de 37,6 hab./ km², la cual se espera que continúe en ascenso, según las proyecciones realizadas por el DANE en el 2011 se debía alcanzar una densidad de 40,2 hab./ km² (DANE, 2011).

En los últimos años Colombia ha pasado por grandes transformaciones en la distribución de la población, pasando de ser un país con pequeñas ciudades y baja densidad en el siglo XX, a un país de características metropolitanas conformado por centros urbanos como los son Bogotá, D. C., Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga (DANE, 2011) (E.A.A.B, El agua en la historia de una ciudad, 1997).

Con base en lo anterior se estableció Bogotá, Manizales, Cartagena y Cali como los casos de estudio a los cuales se les realizara el análisis del desarrollo de las RDAP.

5. DESARROLLO DE LAS RDAP EN COLOMBIA

5.1 Bogotá

La historia del Sistema de Distribución de Agua Potable de la ciudad de Bogotá inicia en el año 1584, con la construcción de la primera fuente de agua denominada el Mono de la Pila, las aguas eran conducidas hasta la plaza principal encauzadas por una cañería de cal, ladrillo y piedra que partían del río San Agustín. La cañería que transportaba el agua atravesaba una zona con arbustos de Laurel, por esta razón el acueducto se llamó “El acueducto Los Laureles”. Durante los siguientes 100 años aproximadamente, se añadieron al sistema otras fuentes de agua y derivaciones. En 1700, se construyó un nuevo acueducto llamado “El Acueducto de Agua Nueva”, el cual llegó a suplir las deficiencias del acueducto Los Laureles. La primera tubería de hierro de la ciudad fue inaugurada en 1880 (E.A.A.B, El agua en la historia de una ciudad, 1997).

Posteriormente, en 1900 se construyeron tanques en las zonas más altas de la ciudad, se inició la desinfección del agua por medio del cloro y se iniciaron obras como el embalse de la Regadera y la planta de tratamiento de Vitelma, además de los embalses de Chisacá, los Tunjos y la Planta de tratamiento de San Diego (DANE, 2011).

El manejo, control y suministro del agua potable en Bogotá estuvo a cargo la Junta Administradora del Ramo de Aguas en 1846, seguidamente por la Compañía del Acueducto de Bogotá en 1889 y finalmente por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá desde 1950 hasta la actualidad (E.A.A.B, El agua en la historia de una ciudad, 1997).

A continuación, se realizará un análisis del desarrollo de la Red de Distribución de Agua Potable de Bogotá con mayor detalle.

5.1.1 Sistemas de Captación de Agua

La RDAP de la ciudad de Bogotá, cuenta con un sistema de captación de agua distribuido de la siguiente manera:

- Sistema Tunjuelito: Esta ubicado en la zona sur de Bogotá y cuenta con 3 Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), Vitelma (1938), La Laguna (1984) y El Dorado (2001), las dos primeras están conectada al embalse La Regadera, el cual fue el primer embalse construido para el suministro de agua potable en la ciudad (1934), mientras que la PTAP El Dorado está conectada al embalse Chisacá. Este sistema se alimenta por los ríos Tunjuelo, San Francisco y San Cristóbal.
- Sistema Tibitoc: Esta ubicado en la zona norte de Bogotá, cuenta con la PTAP Tibitoc construida en 1959 y está conectada a los embalses Sisga, Tomine y Neusa. Su fuente de abastecimiento es la cuenca alta del Rio Bogotá. Este sistema es el encargado de distribuir el agua a la zona norte de la ciudad y algunos municipios aledaños como Sopo, Cajica, Chía, entre otros.
- Sistema Chingaza: Este sistema hace parte del proyecto Chingaza, el cual se llegó a cabo en el año 1985, cuenta con la Planta de Tratamiento Francisco Wiesner, la cual está conectada a los embalses Chuza y San Rafael. Los ríos que alimenten este sistema con el Guatiquía, Blanco Y Teusaca. Este proyecto garantiza el agua potable aproximadamente al 70% de la ciudad de Bogotá.

System	Reservoir	Capacity (Mm ³)	Total capacity (Mm ³ /s)
North aggregate system	Tominé	690	887
	Neusa	95	
	Sisga	102	
South aggregate system	Chisacá	7.4	13.6
	La Regadera	3.8	
	Laguna Los Tunjos	2.4	
Chingaza system	Chuza	250	325
	San Rafael	75	
Total		1226	1226

Tabla 3 Sistemas de captación de agua de Bogotá (Aldana & López, 2017)

System	WTP	Capacity (m ³ /s)	Total Capacity (Mm ³ /s)	Current supply flow (m ³ /s)
North aggregate system	Tibitoc	10.5	10.5	4.70
South aggregate system	El Dorado	1.6	3.5	0.43
	La Laguna	0.4		0
	Yomasa	0.025		0.01
	Vitelma	1.5		0
Chingaza System	F. Wiesner	14	14	10.6
Total		27.3	27.3	15.73

Tabla 4 Plantas de Tratamiento de Agua Potable en Bogotá (Aldana & López, 2017)

5.1.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)

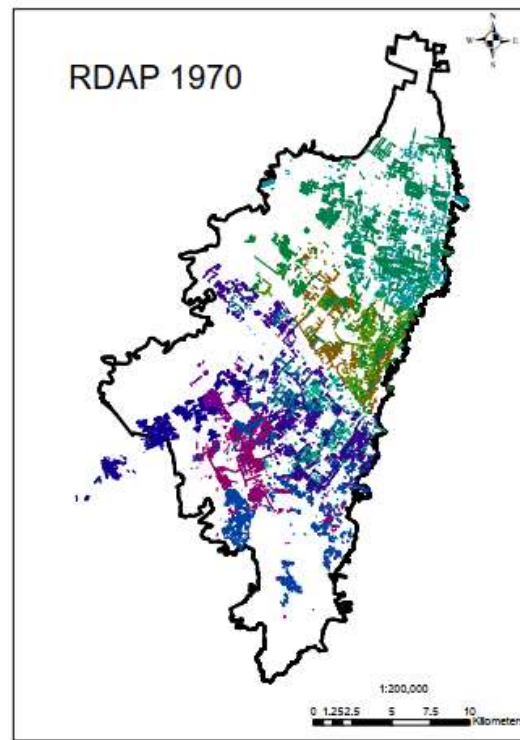
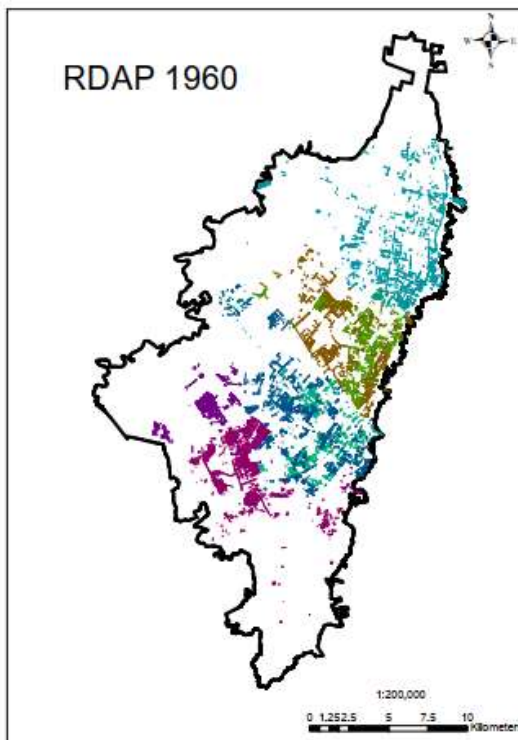
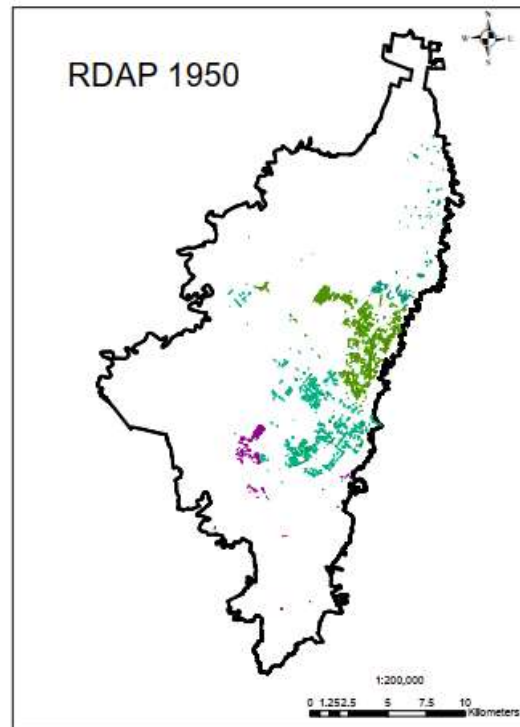
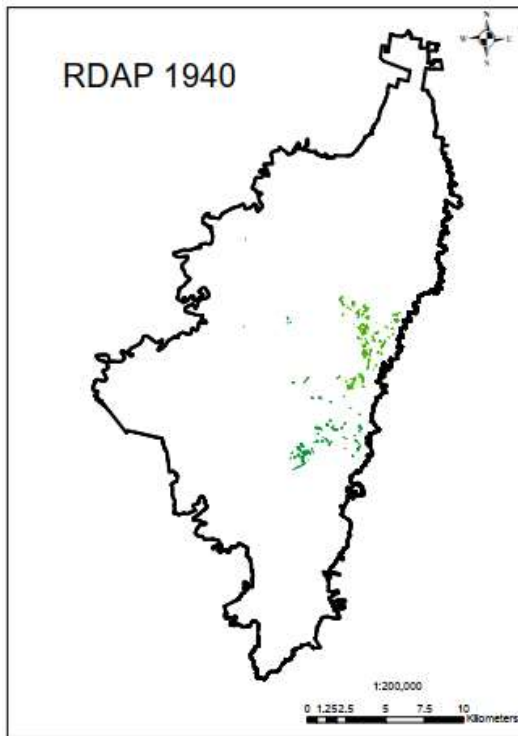
Actualmente la RDAP de Bogotá está dividida en 2 sistemas complementarios, la Red Matriz y la Red Menor. La Red matriz está compuesta por las series de tuberías con diámetros mayores a 12 pulgadas, incluidos los túneles y las líneas de transmisión, mientras que la Red Menor incluye las tuberías con diámetros menos a 12 pulgadas, los puntos de consumo y la infraestructura para mantener niveles adecuados de presión en el sistema de distribución (Aldana & López, 2017).

En la década de 1940, la longitud de la RDAP era de 33 km y el número de tuberías era 1868. El diámetro que cubría la mayor parte de la red es de 3 in. Los materiales predominantes eran el HG (20.4%) y el PVC (52%).

En la década de 1950, la longitud de la red paso a ser 233 km y el número de tuberías a 9309. El 60% de la red tenía diámetros de 3, 4 y 6 in. El material predominante era el AC con un 51%.

En la década de 1960, la longitud de la red paso a ser de 910 km y las tuberías a 30131. El material predominante continuo siendo el AC con un 68%.

En la década de 1970, la longitud de la red paso a ser 1830 km y el número de tuberías aumento a 59823. Los diámetros predominantes continuaron siendo 3, 4 y 6 in cubriendo el 80% de la red menor. El material predominante continuaba siendo el AC.



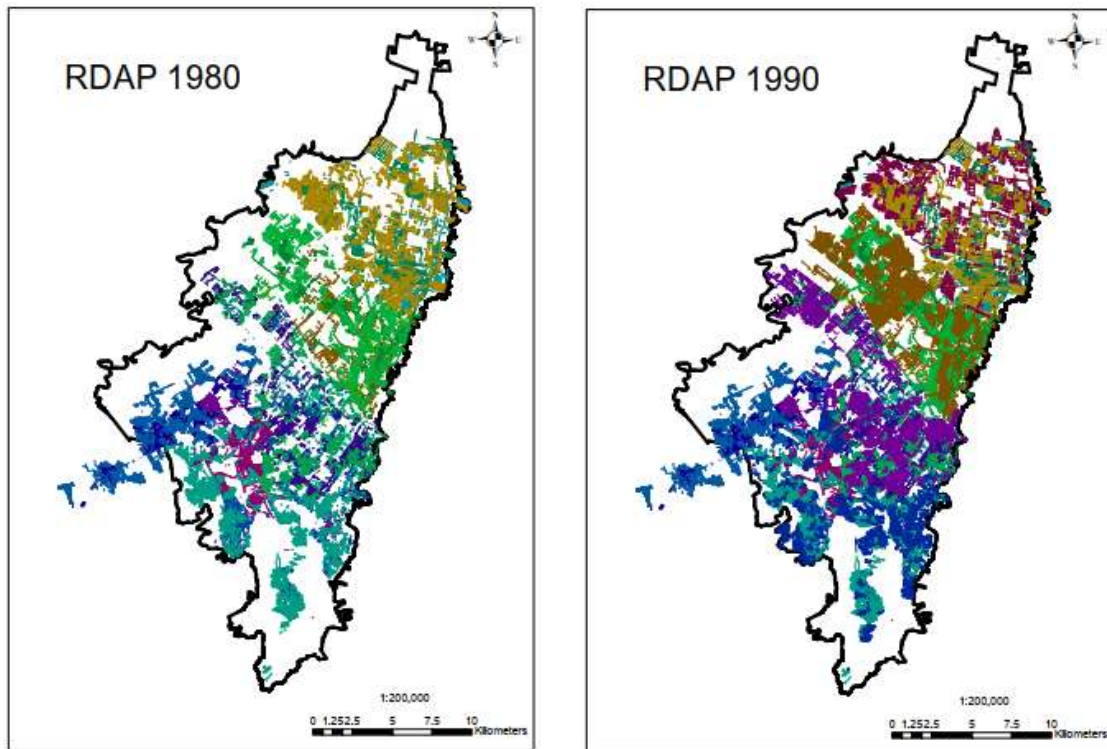


Figura 6 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Bogotá desde 1940 hasta 199

5.2 Cali

El primer acueducto de Cali se fundó en 1778, estaba conformado por las pilas San Pedro, Jaime, Crespo y Lores. En 1903 se construyeron las pilas Chanca, Matadero, Belalcázar, Buenaventura y Gonzalez (Vásquez, E. 2008).

En 1916 se inició la construcción del acueducto metálico a presión, seguido de la primera red de acueducto con tubería en hierro en 1910. Otro acontecimiento importante fue la construcción de la PTAP San Antonio en 1930 (Vásquez, E. 2008).

La principal fuente de abastecimiento de la ciudad hasta el año 1930 fue el río Cali, pero debido al acelerado crecimiento de la ciudad y los problemas de desabastecimiento que se presentador en esta época, fue necesario considera usar el río Cauca como fuente de abastecimiento a pesar de que la calidad de este era menor a la del río Cali y se encontraba a muy baja altura y por lo tanto era necesario bombear el agua desde allí. En 1953 se construyó la PTAP del río Cauca junto con el tanque de almacenamiento La Normal, la red Principal Sur y redes domiciliarias para los barrios del sur y sureste. La PTAP Río Cauca era la encargada de abastecer la Red Baja de la ciudad, mientras que la PTAP San Antonio abastecía la Red Alta (Vásquez, E. 2008).

En 1960 el río Cauca se convirtió en la principal fuente de abastecimiento, es por esto que fue necesario ampliar el sistema con la construcción del segundo tanque de La Norma, el primero de Siloé y el de la Campiña, además de la construcción de alguna estación de bombeo (Vásquez, E. 2008).

En 1976 se inauguró la Planta de Tratamiento Puerto Mallarino, adicionalmente se realizó la ampliación de la Planta San Antonio y de las estaciones de bombeo Terron Colorado, Siloé y Bellavista. En 1993 entró en operación la PTAP la reforma, abastecida por el río Melendez, con el fin de suministrar el servicio de agua potable a las laderas de la ciudad. Finalmente, en el 2006 las Empresas Municipales de Cali (EMCALI), asumió la operación de la PTAP La Rivera, la cual abastece el sector de Pance (Vásquez, E. 2008). (E.A.A.B, Empresa de Acueducto, n.d.).

5.2.1 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)

En la década de 1940 la RDAP de Cali, contaba con 481 tuberías, tenía una longitud de aproximada 15 km, los diámetros de las tuberías oscilaban entre 2 y 14 in, el 73% de las tuberías tenían un diámetro de 4 in. Los materiales usados para la construcción de la red fueron asbesto cemento (AC), hierro fundido (CI) y policloruro de vinilo (PVP), alrededor del 99% de las tuberías eran de CI.

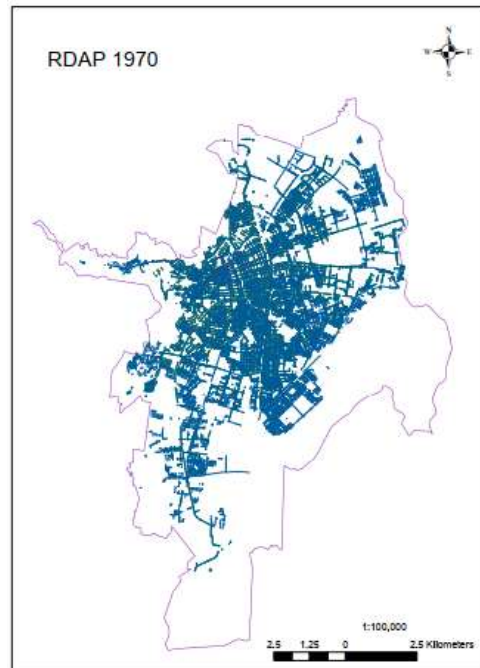
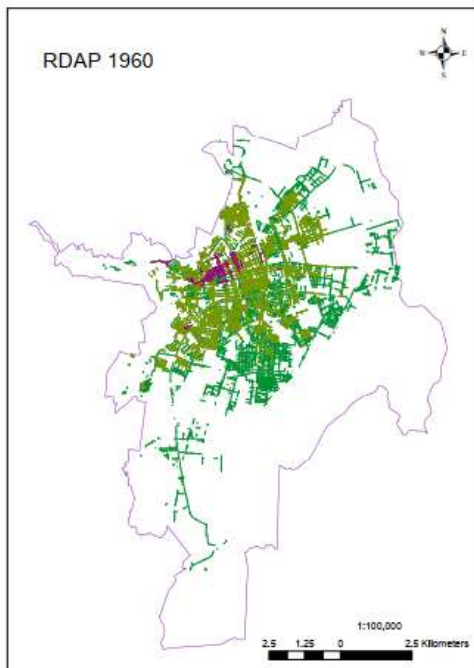
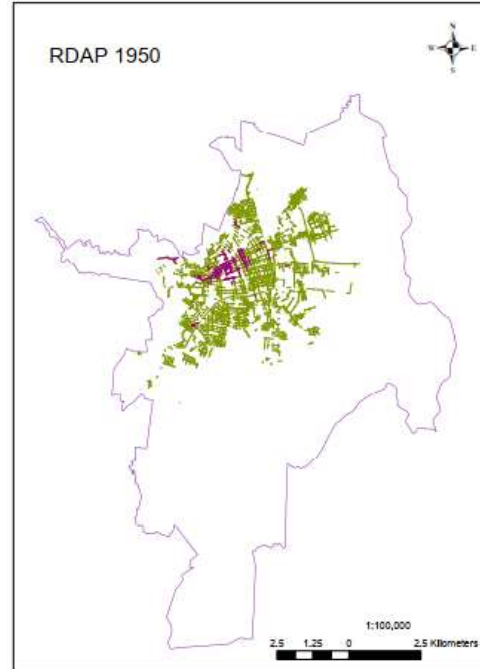
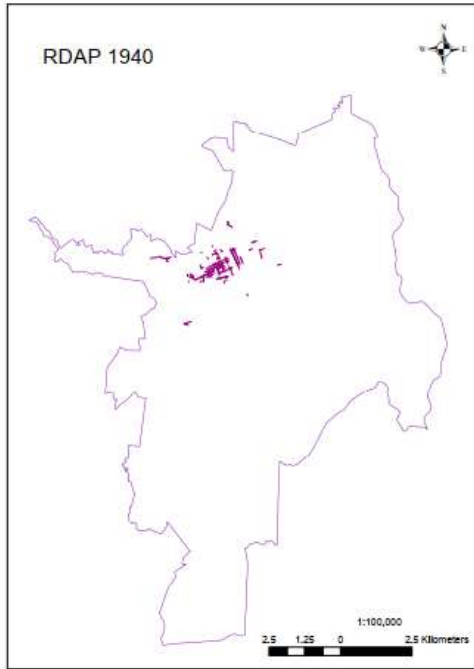
En la década de 1950 la RDAP aumento su longitud a 232 km y el número de tuberías a 6316 en total. Se agregaron tuberías de diámetros de 1 a 40 in, el material más usado continuó siendo el hierro fundido (CI) con porcentaje del 88% con respecto al total de tuberías. Adicionalmente la red contaba con tuberías en acero (ST), cilindro de acero y concreto (CCP).

En la década de 1960, el 57% de las tuberías tenían un diámetro de 4 in, la longitud de la red aumento a 529,11 km y el material predominante continuaba siendo el CI (52,11%) y el AC (44%), se empezó a usar material como el cobre (CU), el polietileno de alta densidad (PAD). En este momento la RDAP ya contaba con 13489 tuberías en total.

En la década de 1970, la longitud de la red era de 808,06 km y el 0,33% de las tuberías tenían un diámetro de 55 in. El material predominante paso a ser el AC con un 60 % respecto al total de tuberías, seguido del CI con un 35%, el porcentaje restante se distribuía en materiales como el ST, PVC, CU y PAD.

En la década de 1980, la longitud total de la red paso a ser 1277,18 km, y las tuberías con un diámetro de 4 in predominaban en un 42,29%. El número total de tuberías paso a ser 31778. Los materiales más usados continuaron siendo el AC (59%) y el CI (22,5%).

Entre la década de 1990 y el 2000 la red aumento su longitud en un 30%, llegando a medir en la actualidad 3.077 km, y contar con 76.033 tuberías, el material predominante paso a ser el PVC, seguido del AC.



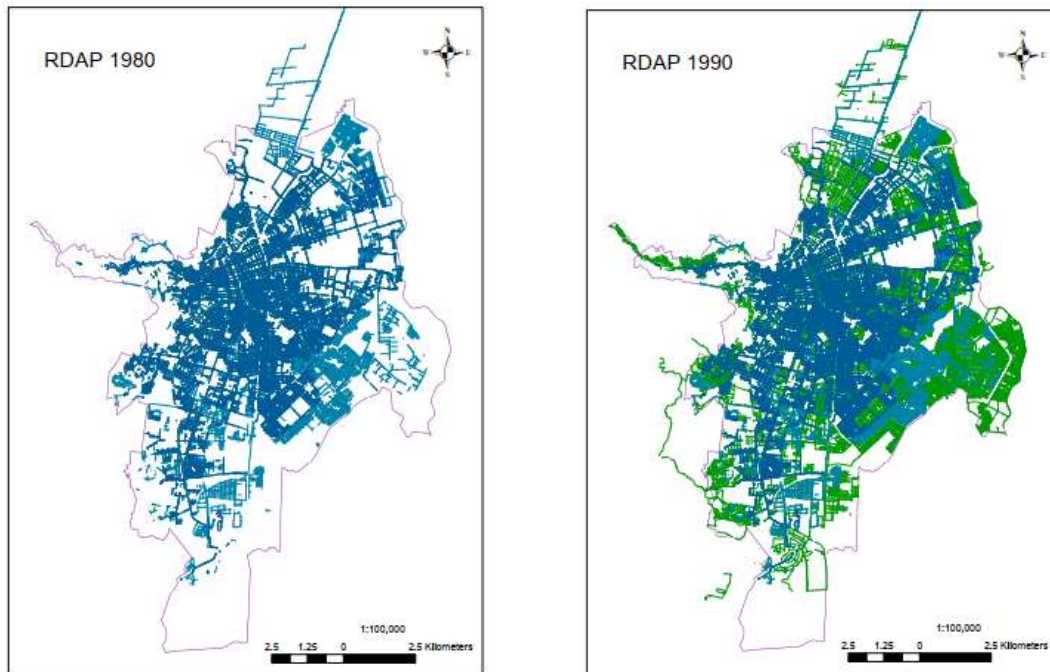


Figura 7 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Cali desde 1940 hasta 1990

5.3 Manizales

La RDAP de la ciudad de Manizales, está constituida por 29 tanques de distribución ubicados en el interior de la ciudad y 17 en áreas rurales. La Red está dividida en 29 sectores hidráulicos. La delimitación de cada sector hidráulico se realizó con base a las características geográficas de la ciudad (Echeverri, 2017).

5.3.1 Sistemas de captación de agua

- Cuenca del Rio Blanco: Desde el rio Blanco se alimentan los sistemas de captación Pinares, La Guerra y La Arenosa, además de La Ye y la toma de agua los olivares (Echeverri, 2017).
- Cuenca Chinchiná: En el rio Chinchiná se conectan 4 tomas de agua denominadas Chinchiná, Cajones, Romerales y Termale, además de un sistema de captación ubicado en la microcuenca de California y La María (Echeverri, 2017).

5.3.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)

En la década de 1930, la RDAP de Manizales tenía una longitud de 15,37 km y 566 tuberías. Los diámetros de las tuberías estaban entre $\frac{1}{2}$ y 12 in, el 50% de las tuberías tienen diámetro de 4 in. El material predominante es el hierro fundido (HF) con un porcentaje de 98%.

En la década de 1940, la red aumento a 26 km de longitud y el diámetro y el material predominante continúa siendo 4 in con un 41% y el HF con 85% respectivamente.

En la década de 1950, la RDAP aumento el número de tuberías a 2685 y su longitud a 82 km aproximadamente. Los diámetros predominantes en la red eran los de 3 y 4 pulgadas con un 30% y 35% respectivamente. El material más usado paso a ser el AC con un porcentaje del 55.68% respecto al total de tuberías.

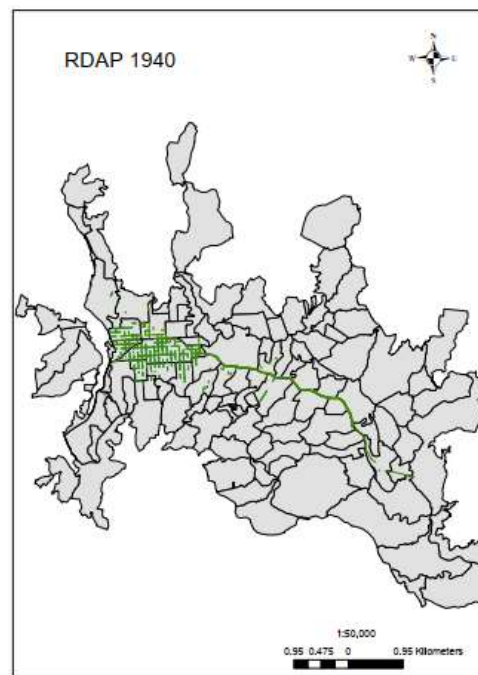
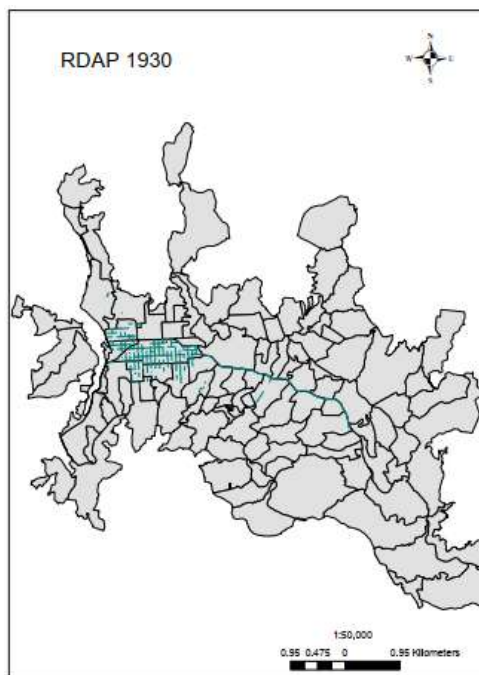
En la década de 1960, el número de tuberías la red aumento en un 58% con respecto a la década de los 50. La longitud total paso a ser de 115 km y los diámetros predominantes continuaron siendo de 3 y 4 in.

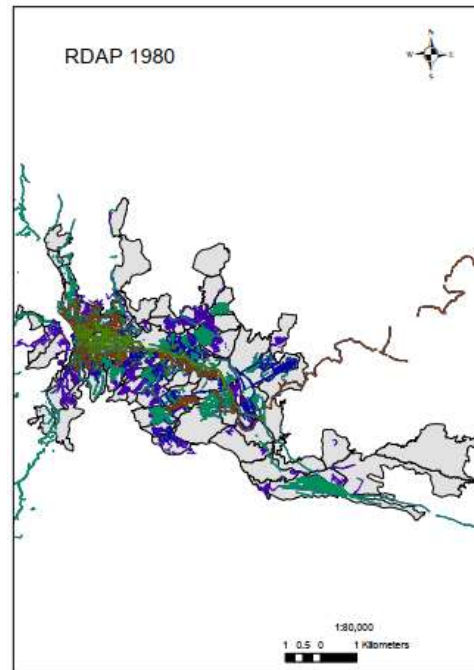
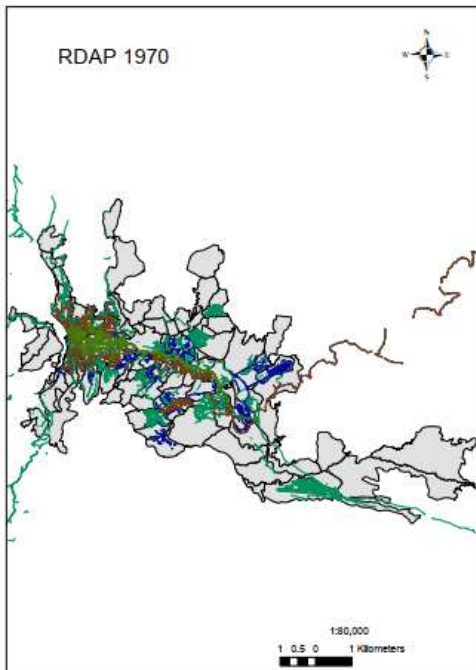
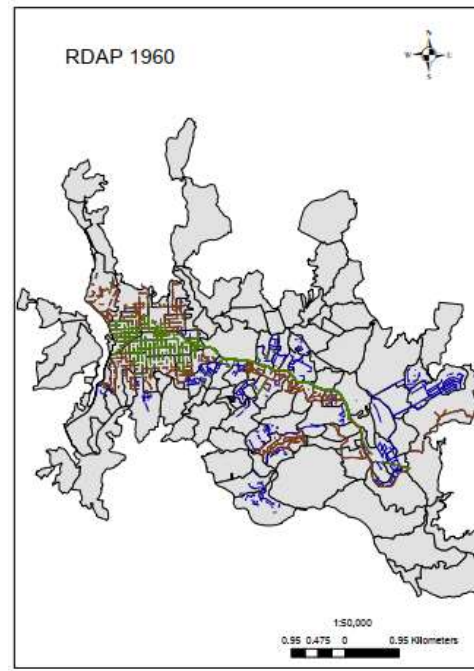
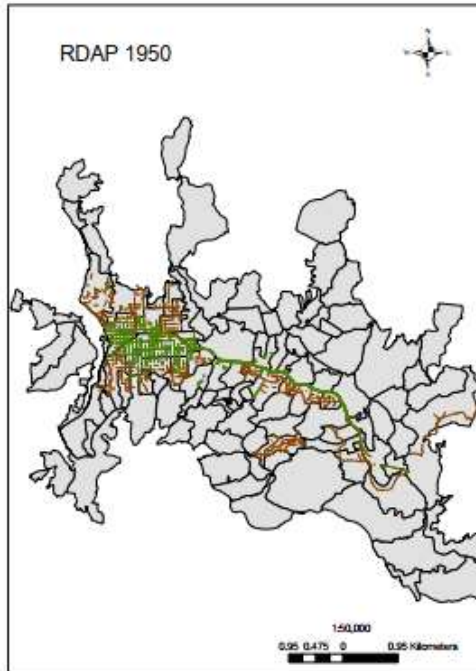
En la década de 1970, el número de tuberías de la red paso a ser 13483 y su longitud aumento en un 200%, pasando a ser 388 km. El diámetro predominante en la red era de 3 in, y el material más usado paso a ser el PVC cubriendo el 51% de la red.

En la década de 1980, el número total de tuberías era de 18370, y la longitud de la rede había aumentado a 508 km y el material predominante era el PVC.

En la década de 1990, el número de tuberías aumento a 22822, la longitud de la red a 669 km y el diámetro más usado era el de 3 in. Al igual que desde la década de los 70 el material predominante es el PVC con un porcentaje del 66% con respecto al total de tuberías de la red.

Actualmente, la red tiene una longitud aproximada de 942 km y 32047 tuberías, el material predominante continúa siendo el PVC con un porcentaje del 61%.





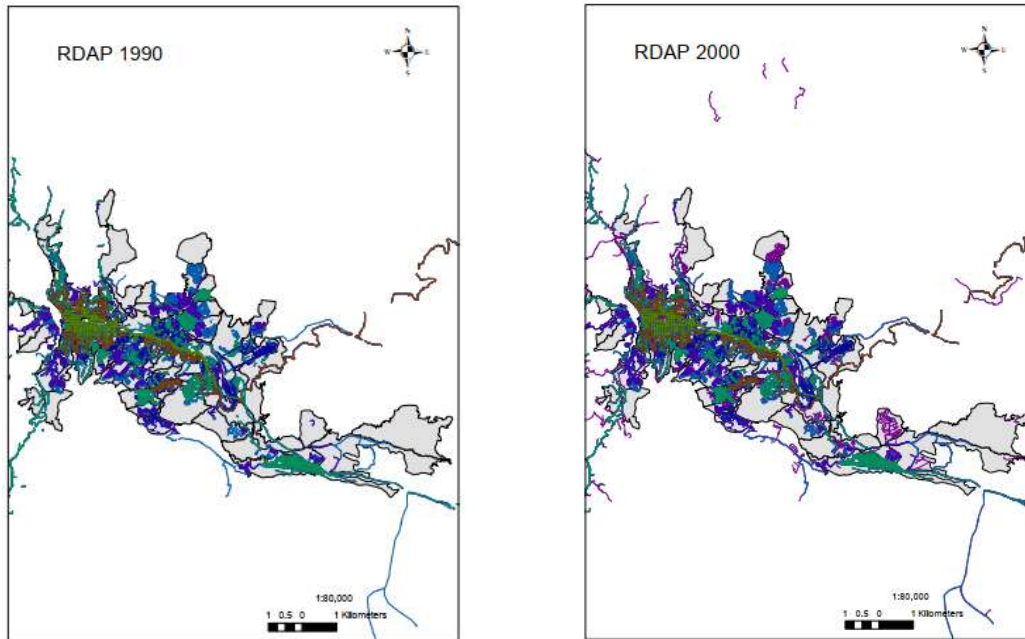


Figura 8 Desarrollo de la RDAP de la ciudad de Manizales desde 1930 hasta el 2000

5.4 Cartagena

La Red de Distribución de Agua Potable de Cartagena, está compuesta por 2 sistemas, aducción y conducción. El agua se trasporta por medio de un sistema de bombeo desde el canal de Dique hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable EL Bosque, a partir de allí el agua es distribuida a los 10 sectores hidráulicos, por medio de tanques, estaciones de bombeo y conducciones por gravedad (Angulo, Urueta, Valverde, & Paternina, 2017).

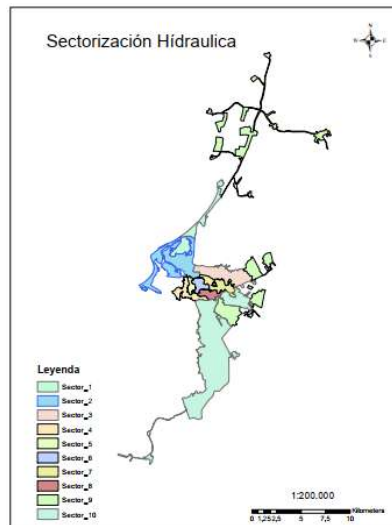


Figura 9 Sectorización hidráulica de la ciudad de Cartagena

5.4.1 Sistemas de captación de agua potable

La RDAP de Cartagena cuenta con dos sistemas de captación de agua:

- Sistema Gambote: Este fue el primer sistema de captación construido en Cartagena, es alimentado por el canal del Dique (Angulo et al., 2017).
- Sistema Dolores: El canal del Dique, alimenta la Laguna Juan Gomez, desde allí se bombea el agua cruda a través de la estación de bombeo de la PTAP Dolores. Adicionalmente cuenta con la estación de bombeo Conejos la cual bombea agua desde el canal de dique a la laguna para mantener los niveles de captación del sistema Dolores (Angulo et al., 2017).

5.4.2 Red de Distribución de Agua Potable (RDAP)

En la década de 1930, la RDAP de Cartagena contaba con 49 tuberías y el 67% de las tuberías tenía un diámetro de 30 in, la longitud de la red alcanzaba la aproximadamente los 6 km.

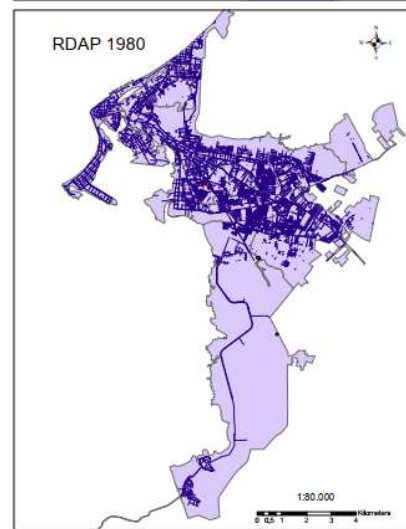
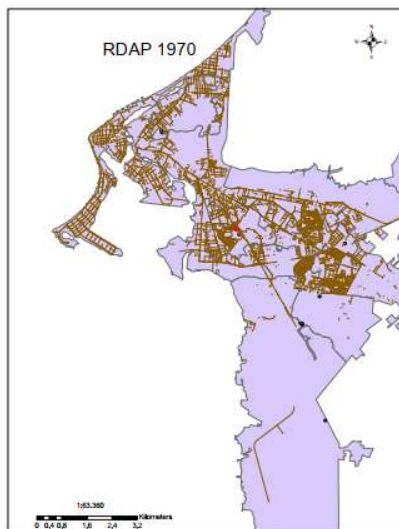
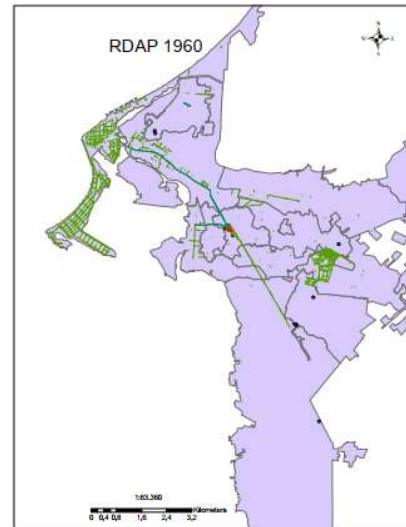
En la década de 1960, la RDAP pasó a tener 2001 tuberías y su longitud aumento a 94 km. El 48% de la red tenía un diámetro de 4 in, y las tuberías de 30 in pasaron a solo estar presentes en el 2% de la red. El material predominante era el HF cubriendo el 61% de la red.

En la década de 1970, la red pasó a tener una longitud total de 394 km y el número de tuberías aumento a 8399, el diámetro predominante continuó siendo el de 4 in y el material predominante paso a ser el AC con un 63%.

En la década de 1980, el número de tuberías de la red paso a ser 13957 y la longitud total de la red aumento a 657 km. El diámetro predominante continuó siendo el de 4 in con un porcentaje de 48%. En esta época el material más usado era el PVC con un 40%.

En la década de 1990, el número de tubería aumento a 20903 y la longitud paso a ser 967 km. El material predominante continuó siendo el PVC con un porcentaje de 32%.

Actualmente, la RDAP de Cartagena tiene aproximadamente 1540 km de longitud, su topología es principalmente de tipo “Grid”. Los diámetros de las tuberías estaban entre 14 in y 40 in. Alrededor del 14% de la red cuenta con tuberías con un diámetro mayor o igual a 14 in y el 86% restante de la red tiene tuberías con diámetros menores a 14 in estas tuberías conforman la red de distribución secundaria. El material predominante en estas redes es el PAD que cubre casi el 50% de la red(Angulo et al., 2017).



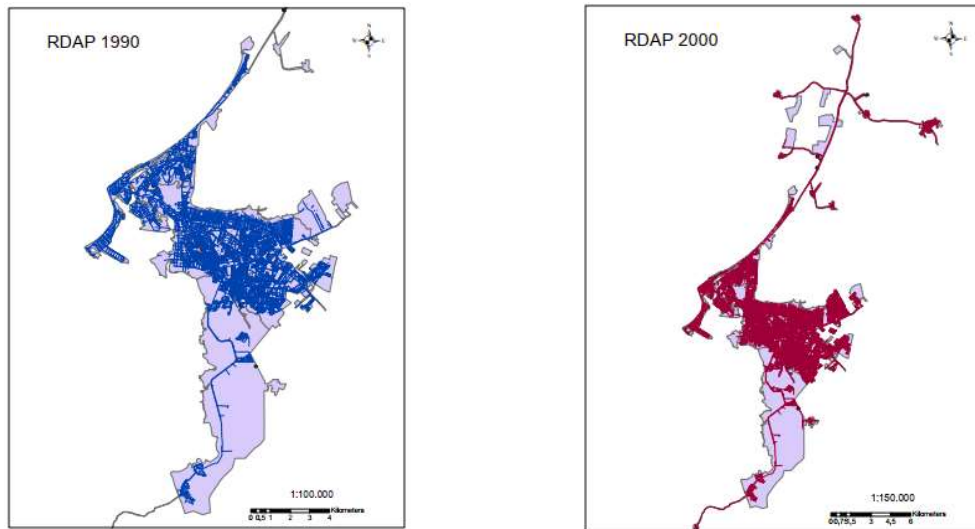


Figura 10 Desarrollo histórico de la RDAP de la ciudad de Cartagena desde 1938 hasta el 2000

Una característica importa que llama la atención en el desarrollo de las RDAP de las 4 ciudades a estudiar, es el gran número de materiales que se han usado para construir las redes, en la mayoría de las ciudades las RDAP están compuestas por tuberías de 3 o 4 materiales como lo son, HF, AC, PVC y PAD. El uso de varios materiales para la construcción de las RDAP en Colombia está permitido siempre y cuando las tuberías que se usen, cumplan con las especificaciones que el Instituto Nacional de Normas Técnicas (ICONTEC) o en su defecto las normas internacionales AWWA,ISO,ASTM,DIN estipulen, adicionalmente todas las tuberías deben cumplir con lo establecido por las Resoluciones 1166 de 2006 y 1127 de 2007 (Reglamento Técnico de Tuberías) expedidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Vivienda, 2010).

Es importante tener en cuenta que la selección del material a usar en la construcción de la RDAP debe realizarse con base a las características topográficas de la zona, la agresividad del suelo y a las condiciones hidráulicas del diseño. Además de lo anterior, la decisión de usar diferentes materiales en una RDAP depende el tipo de funcionamiento, operación y mantenimiento y condiciones del terreno en donde se planea desarrollar la RDAP (Ministerio de Vivienda, 2010).

Independientemente de que sea posible usar múltiples materiales en la construcción y expansión de las RDAP en Colombia, se puede evidenciar que existe una preferencia a un tipo de material en los diferentes periodos de tiempo a estudiar. Esto se debe principalmente a factores como la resistencia a la corrosión, a las condiciones de instalación, toxicidad, a las condiciones económicas de cada proyecto y finalmente a la vida útil de cada uno de los materiales.

6. ANALISIS DEL DESARROLLO DE LA RDAP EN COLOMBIA

Para realizar el análisis del desarrollo histórico de las RDAP de las diferentes ciudades de Colombia fue necesario seguir los siguientes procedimientos:

- Se solicitó información topológica e hidráulica a cada una de las empresas de acueducto de las ciudades seleccionada como casos de estudio, es decir para información de la ciudad de Bogotá se pidió información a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB), para Manizales a Aguas de Manizales, para Cartagena a Aguas de Cartagena y finalmente para Cali a la Empresas Municipales de Cali (EMCALI).
- Se identificó a partir de la información suministrada por cada una de las empresas de acueducto las fechas de instalación de cada una de las tuberías, para luego ser clasificadas en periodos de tiempo entre 5, 10 y 20 años dependiendo de la información disponible.
- Se creó una capa de las tuberías que fueron instaladas en cada uno de los diferentes intervalos de tiempo y se generó un archivo shape. file compatible con el programa ArcMap. Seguidamente cada una de las capas fueron exportadas al programa WaterGems con el fin de crear un modelo hidráulico para cada uno de los años escogidos para el análisis.
- Se obtuvo información, a partir del Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI) del número de suscriptores por año de cada una de las ciudades, desde el 2002 hasta el 2018.
- A partir de esta información, fue posible realizar una proyección de suscriptores para los años anteriores al 2002, siguiendo los métodos de proyección de población propuestos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS- 2000).

Según el RAS, si no se cuentan con datos históricos confiables de demanda de agua en cada uno de los municipios donde se desea realizar un diseño o expansión o mejorar la RDAP, se debe realizar una proyección de los suscriptores conectados al sistema de acueducto usando métodos matemáticos como los aritméticos y geométricos, métodos de aproximaciones sucesiva a las proyecciones de suscriptores o métodos heurísticos (Ministerio de Vivienda, 2010).

Para cada uno de los casos de estudio se realizó la proyección de suscriptores por medio de los siguientes métodos:

- Método Aritmético

$$P_f = P_{uo} + \frac{P_{uo} - P_{oi}}{T_{uo} - T_{oi}} x (T_f - T_{uo}) \quad (\text{Ministerio de Vivienda, 2010})$$

Ecuación 24 Método Aritmético

Donde,

P_f = Poblacion conrrespondiente al año para el que se quiere realizar la proyeccion.

P_{uo} = Población correspondiente al ultimo año de informacion con que se cuenta.

P_{oi} = Población correspondiente al primer año de informacion con que se cuenta.

T_{uo} = Año correspondiente al ultimo año con informacion que se cuenta.

T_{oi} = Año correspondiente al primer año con informacion que se cuenta.

T_f = Año al cual se quiere proyectar la informacion.

○ Método Geométrico

$$P_f = P_{uo} + (1 + r)^{T_f - T_{uo}}$$

Ecuación 25 Método Geométrico

(Ministerio de Vivienda, 2010)

$$r = \left(\frac{P_{uo}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uo} - T_{oi})}} - 1$$

Donde,

r = Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

○ Método Exponencial

$$P_f = P_{oi} x e^{kx(T_f - T_{oi})}$$

Ecuación 26 Método Exponencial

(Ministerio de Vivienda, 2010)

$$k = \frac{\ln P_{oi} - \ln P_{oa}}{T_{op} - T_{oa}}$$

k = es la tasa d crecimiento de la poblacion la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos.

P_{oa} = Población correspondiente al censo anterior.

Luego de realizar dicha proyección se escogió el método que más se adaptaba al conjunto de datos de cada ciudad y se tomaron dichos valores para obtener el número de suscriptores aproximado para cada año escogido para realizar el estudio.

- A partir de la información hidráulica y de suscriptores del año más actual de cada una de las redes a estudiar y el número de suscriptores proyectado de cada uno de los años a evaluar, se estableció una relación entre estos factores con el fin de modificar la demanda base de los modelos hidráulicos creados para cada año, y así lograr que las demandas de los nudos estuvieran más acordes con la extensión de la red y su topología.

$$q_{i\text{anterior}} = q_i^* \frac{\text{Suscriptores}_{\text{ayer}}}{\text{Suscriptores}_{\text{hoy}}}$$

Ecuación 27

$$q_i^* = q_i \frac{\text{Caudal total}_{\text{hoy}}}{\text{Caudal total}_{\text{ayer}}^*}$$

Ecuación 28

Donde,

$$\begin{aligned} q_{i\text{anterior}} &= \text{Demanda en el nodo } i \text{ de la red antigua} \\ q_i &= \text{Demanda base en el nodo } i \text{ de la red mas actual.} \\ \text{Caudal total}_{\text{ayer}}^* &= \text{Caudal total de la red antigua sin modificar la demanda base.} \\ \text{Caudal total}_{\text{hoy}} &= \text{Caudal total de la red mas actual.} \end{aligned}$$

Esta aproximación se realiza con el fin de redistribuir el caudal total demandado por la red a una proporción acorde con el desarrollo de las redes en cada uno de los años estudiados.

- Se desarrolló una herramienta en con el lenguaje de programación R, para calcular los indicadores de teoría de grafos escogidos para evaluar las redes, se escogió este lenguaje de programación debido a que cuenta con un paquete denominado Igraph el cual permite calcular la mayoría de los indicadores de teoría de grafos a partir de la información de conectividad de la red.
- A partir de una herramienta existente en el lenguaje de programación MatLab fue posible calcular los indicadores de rendimiento hidráulico descritos en el Capítulo 3 del presente documento para cada una de las redes.
- Por último, se calcularon los indicadores geométricos a partir de las coordenadas de cada uno de los nodos de componen cada red. Estas fueron exportadas desde el programa Epanet y ArcMap.

6.1 Aplicación de los indicadores de evaluación a las redes

6.1.1 Bogotá

El Sistema de Distribución de Agua Potable de Bogotá, está dividido en 5 zonas y 37 sectores hidráulicos. La ciudad se ha sectorizado con el fin de facilitar el control de fugas, presiones, labores de mantenimiento, optimizar la operación del servicio en lugares específicos de la ciudad, sin tener que afectar el servicio en las demás zonas de la ciudad (NS-036).

La zona operativa 1 está constituida por los sectores hidráulicos 5,6,7,8,9,18-2,18-3,31,32,34 y 35, la zona 2 por los sectores hidráulicos 4,10,14,16-5,17,18-1,19-5 y 33, la zona 3 por los sectores 3, 11, 12 , 15-1, 16-1, 16-2, 16-3, 16-4, 19-1, 19-2, 19-3, 19-4, 21 y 25-1, la zona 4 ,por los sectores hidráulicos 13, 15-2, 15-3,20,22,23,24,25-2,26,27,28,29,36,37,38, y por último la zona 5 por los sectores 1,2 y 30.

A partir de la información suministrada por la Empresa de Acueducto de Bogotá, fue posible aplicar los indicadores geométricos, de funcionalidad, topológicos y de rendimiento hidráulicos a dos sectores hidráulicos de la ciudad:

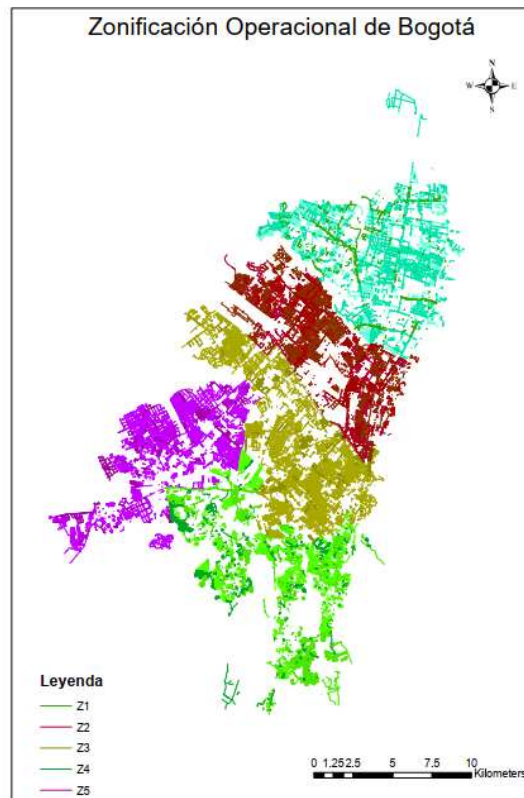


Figura 11 Zonificación Operacional de Bogotá

6.1.1.1 Sector 18

El Sector hidráulico 18, está ubicado en la zona operacional 1 de Bogotá. Como se puede observar en la Figura 12.

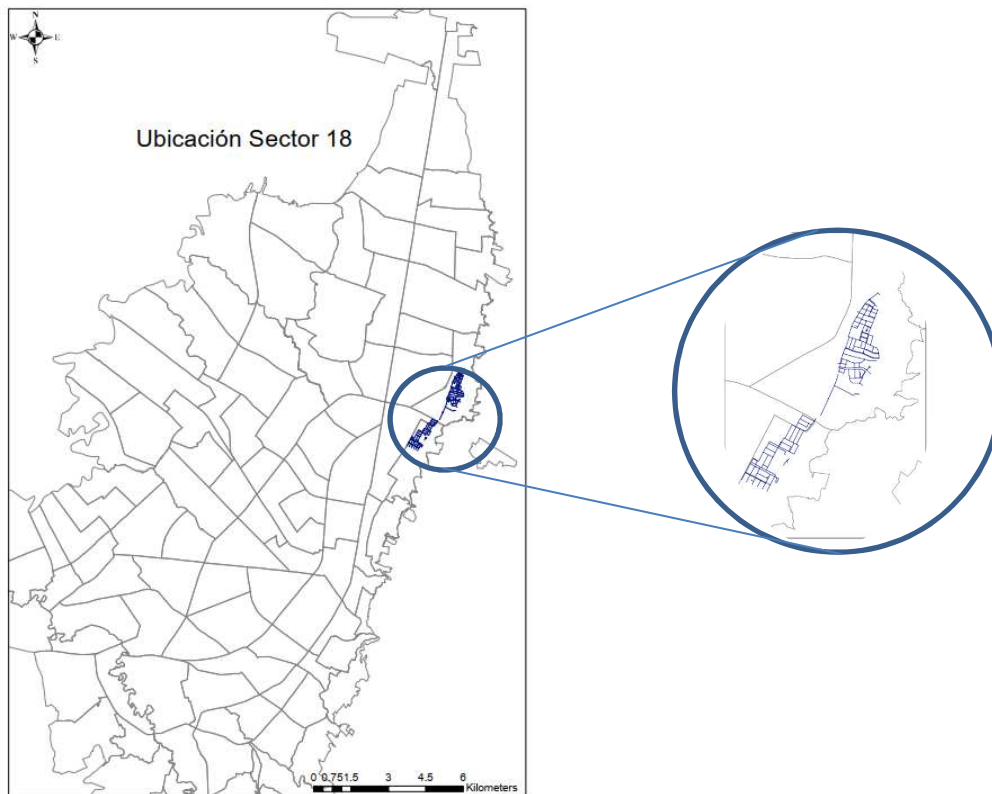
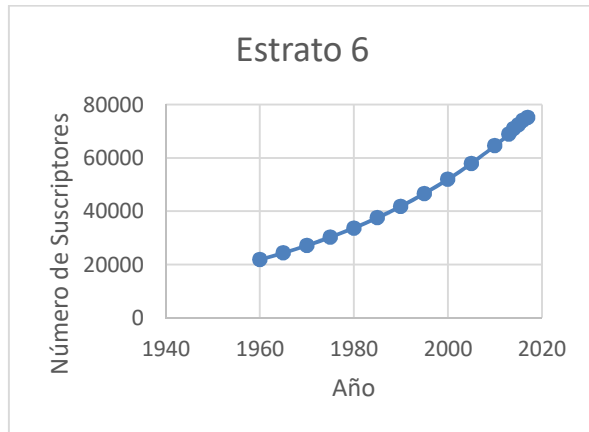


Figura 12 Ubicación Sector Hidráulico 18

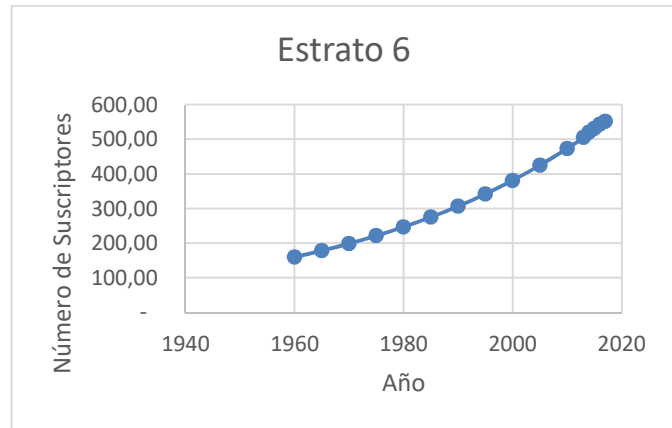
- Proyección de la Población

El Sector Hidráulico 18 está ubicado entre los barrios Usaquén, Santa Bárbara Alta, Santa Ana, Seminario y El Refugio, estos barrios están clasificados en una estratificación socio económica variada, sin embargo, el estrato que predomina es el estrato 6. Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población proyectada para el año 2016 en la ciudad de Bogotá, (8181047) (DANE, 2011) y la población que habitaba en los barrios anteriormente mencionados en el mismo año (60,002), de esta manera se obtuvo un factor de multiplicación de 0.0073 y se obtuvo una

aproximación del número de suscriptores en la zona de estudio. Lo anterior se puede observar en la Gráfica 9 y Gráfica 10.



Gráfica 9 Número total de Suscriptores



Gráfica 10 Número de Suscriptores en el Sector 18

Para el caso de la proyección de suscriptores del Sector Hidráulico 18 el método que más se ajusto fue el Geométrico.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2013 fue de 83.2967 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 5:

Año	<i>Caudal total_{ayer}*</i>	Factor de multiplicación
1975	28.692	1.142
1986	70.8692	0.640
1994	75.2308	0.749
2005	79.139	0.885

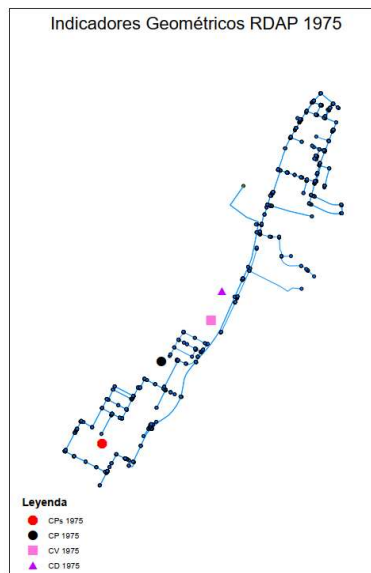
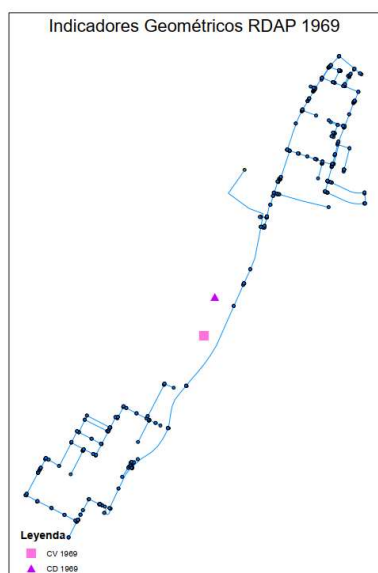
Tabla 5 Factores de Multiplicación

• Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		SPECIFIC POWER CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)		POWER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y	C _x	C _y	C _x	C _y
1969	104354.892	109428.575	(-)	(-)	104424.65	109679.585	(-)	(-)
1975	104360.777	109433.978	103968.084	109105.114	104446.875	109670.184	103497.363	108454.044
1986	104363.038	109436.77	104243.797	109366.422	104410.432	109603.427	103857.817	108802.621
1994	104371.103	109449.981	104263.686	109393.275	104453.897	109673.697	103871.699	108823.633
2005	104371.827	109453.364	104302.86	109470.736	104471.886	109713.863	103957.867	108962.747
2013	104357.791	109426.473	104305.522	109468.539	104467.95	109694.232	103862.06	108797.255

Tabla 6 Indicadores Geométricos Sector 18

Los centroides de la RDAP que se representa por medio del Sector Hidráulico 18, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 13 se puede observar que la variación de Cd, Cv y Cp es mínima a medida que pasa el tiempo. Los centroides Cd y Cv están en función de las características topológicas de la red y se esperaría que cambiaran a medida que la red se va desarrollando, puesto que tanto el número de tuberías como la longitud de la red va aumentando. Con respecto a Cp y CPs se puede observar que el mayor cambio que se presenta en las coordenadas de dichos indicadores es entre los años 1975 y 1986, con una diferencia entre coordenadas de aproximadamente 300 metros.



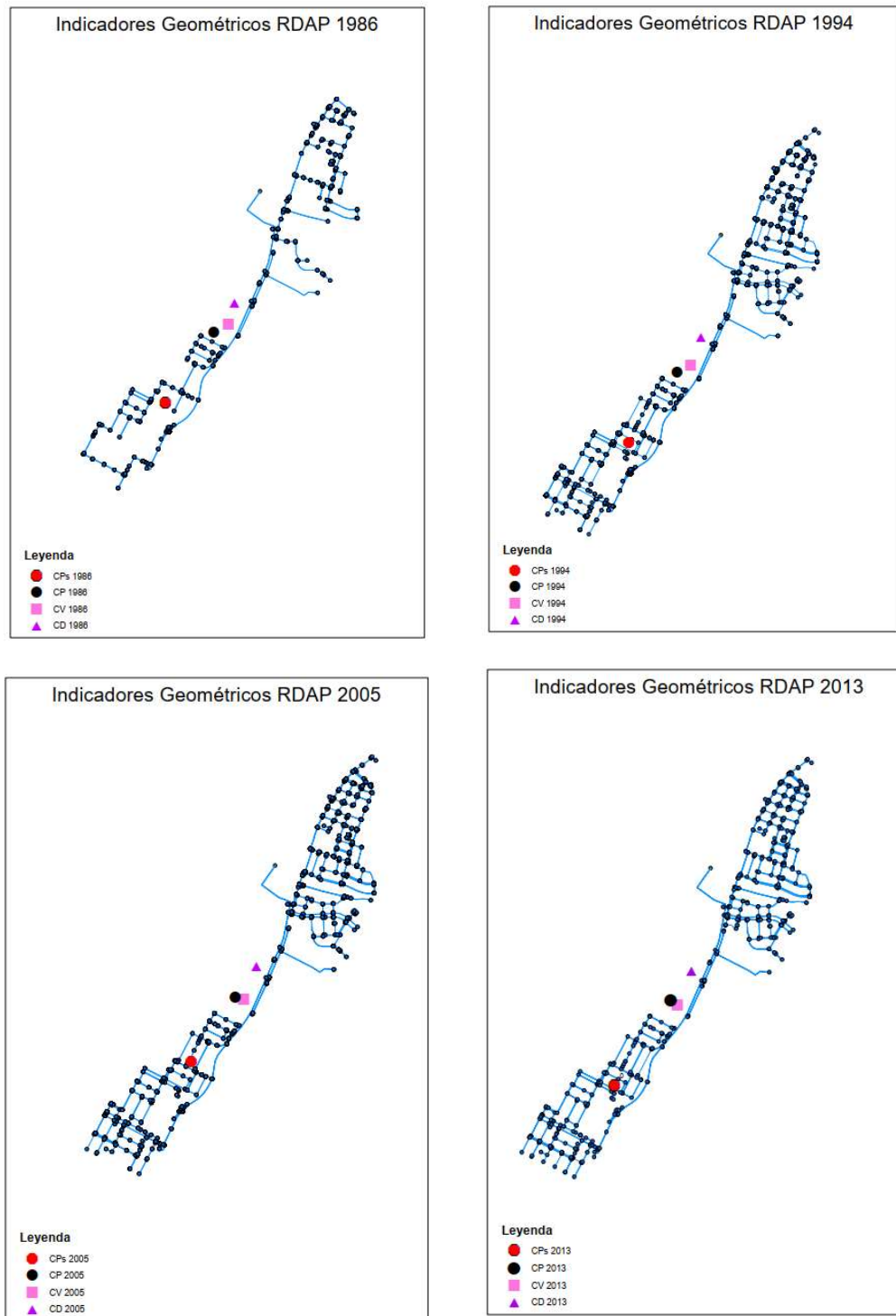


Figura 13 Ubicación Indicadores Geométricos Sector 18

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	\bar{D}
1969	14
1975	12
1986	9
1994	9
2005	9
2013	8

Tabla 7 \bar{D}

En la Tabla 7 es evidente que en los años 1969 y 1975 la función principal de red era de transmisión más no de distribución, y a medida que se fue desarrollando el diámetro predominante de las tuberías era menor a 12 in por lo tanto paso a ser una red de distribución.

- Peoria de grafos

	Indicador/Año	1969	1975	1986	1994	2005	2013
	E	295	369	580	658	690	768
	V	291	365	548	613	639	706
Conectividad	q	0.00699	0.00561	0.0038	0.0035	0.00308	0.00308
	k	2.02	2.03	2.11	2.14	2.16	2.17
	MC	0.00866	0.0097	0.03	0.037	0.04	0.0447
Eficiencia	d	146	160	137	138	114	111
	lt	51.37	55.74	45.64	46.12	41.83	42
Centralidad	Cb	0.357	0.401	0.48	0.492	0.498	0.512
	Cc	0.0204	0.018	0.023	0.0228	0.024	0.0245
Diversidad	h	0.2453	0.255	0.251	0.258	0.2577	0.259
Robustez	$\Delta\lambda$	0.083	0.0526	0.0753	0.11	0.1101	0.0681

Tabla 8 Indicadores de Teoría de Grafos

- Branch Index

Año	BI
1969	0.8274
1975	0.8057
1986	0.5994
1994	0.5612
2005	0.4404

Año	BI
2013	0.402

Tabla 9 Branch Index

En la Tabla 9 se puede observar como a partir del año 2005 el Sector 18 pasa de ser una red ramificada a una red compuesta por circuitos.

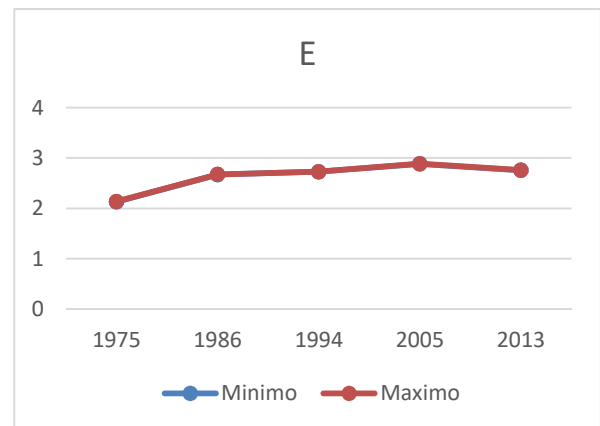
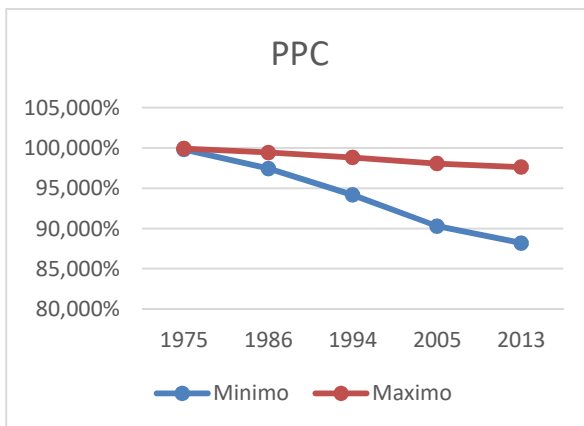
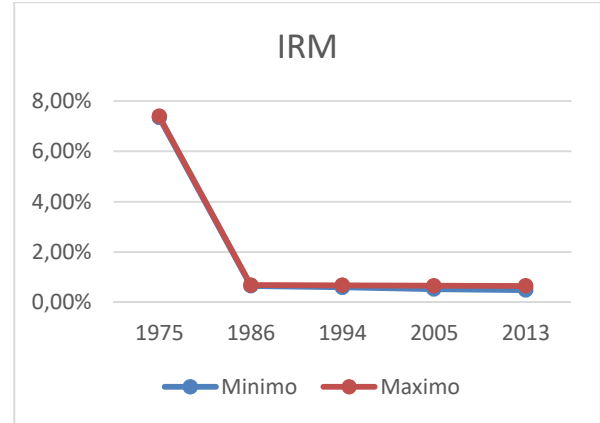
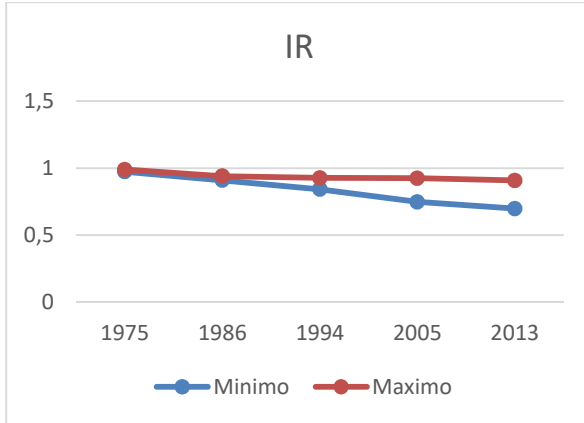
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Los modelos hidráulicos suministrados por la EAAB contaban con un análisis realizado en periodo extendido, se calcularon cada uno de los indicadores de rendimiento hidráulico para las 24 horas de simulación, pero se escogió para analizar el rendimiento del sistema la hora en la que se presentara el valor máximo y mínimo de cada uno de los indicadores hidráulicos. De igual manera el cálculo de los centroides Cp y Cps catalogados como indicadores geométricos, se calcularon a partir de los datos hidráulicos generados a la hora donde se presentó el valor máximo de los indicadores de rendimiento hidráulicos. Es importante realizar esta aclaración, ya que, los centroides Cp, Cps están en función de las características hidráulicas del sistema.

El procedimiento mencionado anteriormente se aplicó para cada uno de los sectores a analizar en este documento.

Indicadores Hidráulicos/Año		1975	1986	1994	2005	2013
IR	Mínimo	0.97335142	0.90985066	0.84245014	0.74815762	0.69876
	Máximo	0.98897201	0.94015735	0.92690736	0.9251039	0.90876347
IRM	Mínimo	7.34%	0.65%	0.5994%	0.526%	0.4901%
	Máximo	7.3938%	0.68%	0.6761%	0.658%	0.6518%
PPC	Mínimo	99.812%	97.442%	94.156%	90.281%	88.17%
	Máximo	99.924%	99.436%	98.806%	98.054%	97.63%
E	Mínimo	2.1307373	2.66966462	2.72599936	2.88345385	2.75599
	Máximo	2.13557887	2.67170882	2.72733831	2.88526082	2.75836

Tabla 10 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Sector 18



6.1.1.2 Sector 25

El Sector Hidráulico 25 está ubicado en la Zona de operación 3. Esto se puede observar en la Figura 14.

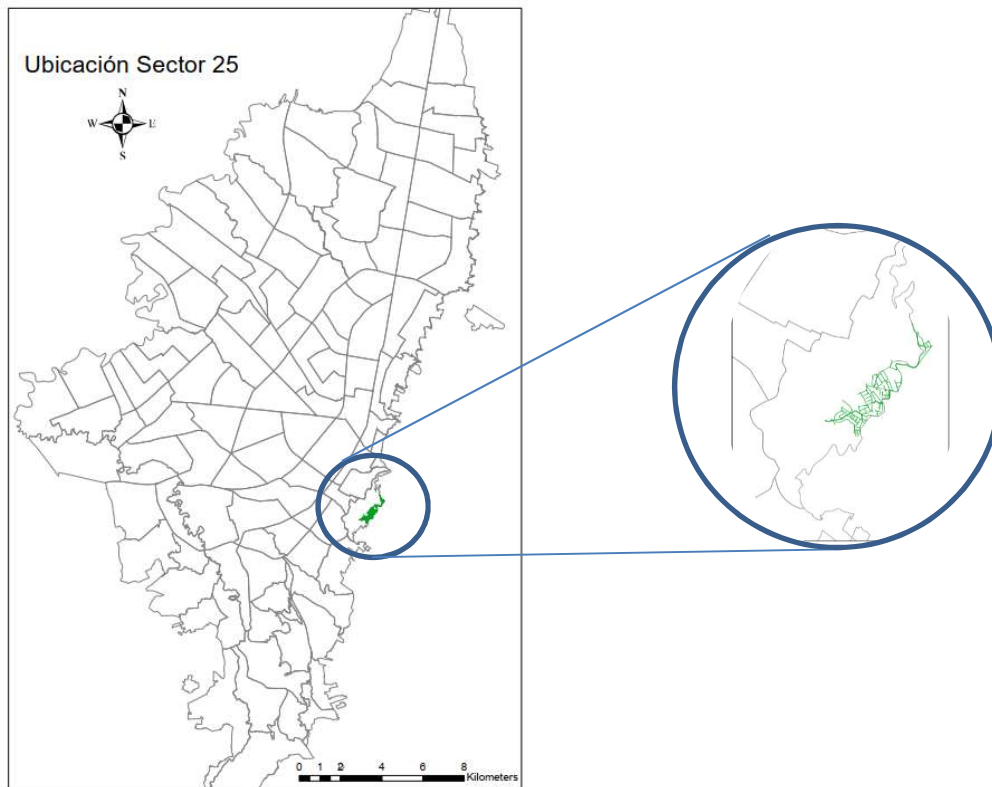
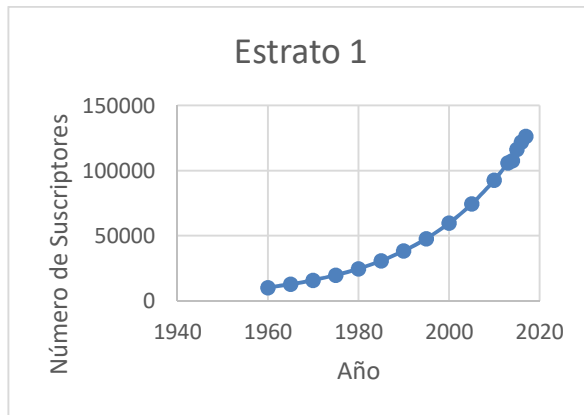


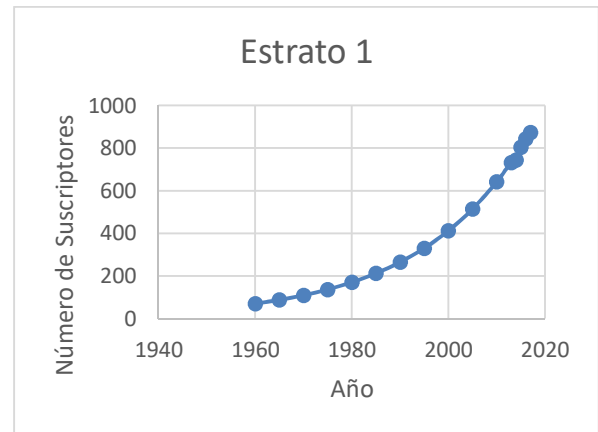
Figura 14 Ubicación Sector 25

- Proyección de Población

El Sector Hidráulico 25 está ubicado en la localidad de Lourdes, esta zona de la ciudad está clasificada en una estratificación socio de estrato 1. Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población proyectada para el año 2016 en la ciudad de Bogotá, (8181047) (DANE 2011) y la población que habitaba la localidad anteriormente mencionados en el mismo año (59597), de esta manera se obtuvo un factor de multiplicación de 0.0069 y se obtuvo el aproximado del número de suscriptores en la zona de estudio. Lo anterior se puede observar en la Gráfica 15 y la Gráfica 16.



Gráfica 15 Número total de Suscriptores



Gráfica 16 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del Sector Hidráulico 25 el método que más se ajustó fue el Geométrico.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2009 fue de 19.85 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la tabla x:

Año	<i>Caudal total_{ayer}*</i>	Factor de multiplicación
1969	4.89	0.693
1975	6.85	0.617
1990	14.35	0.572
2005	18.53	0.859

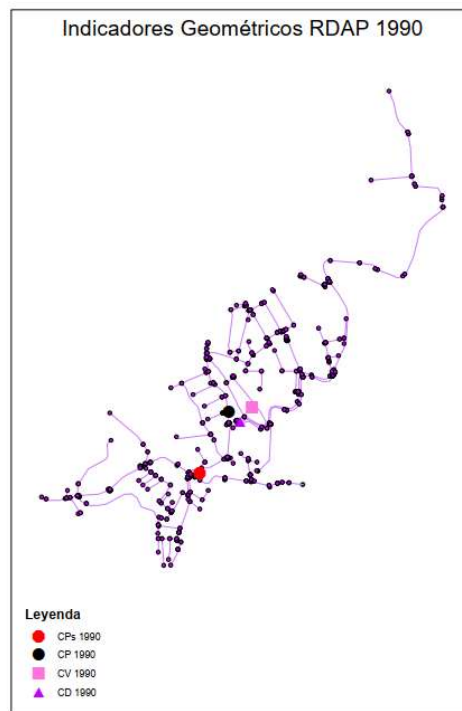
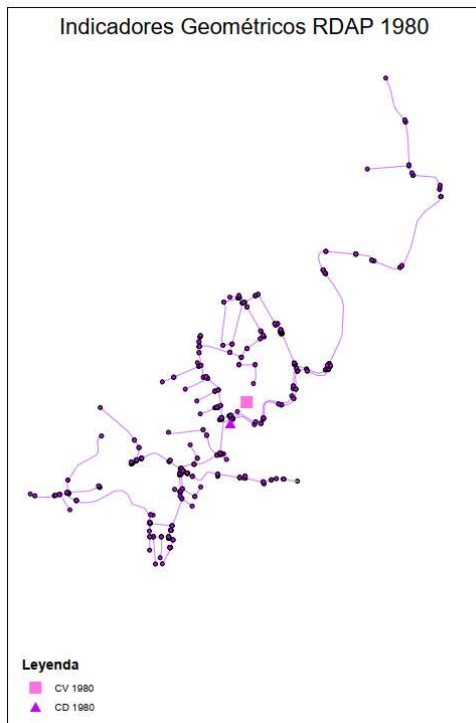
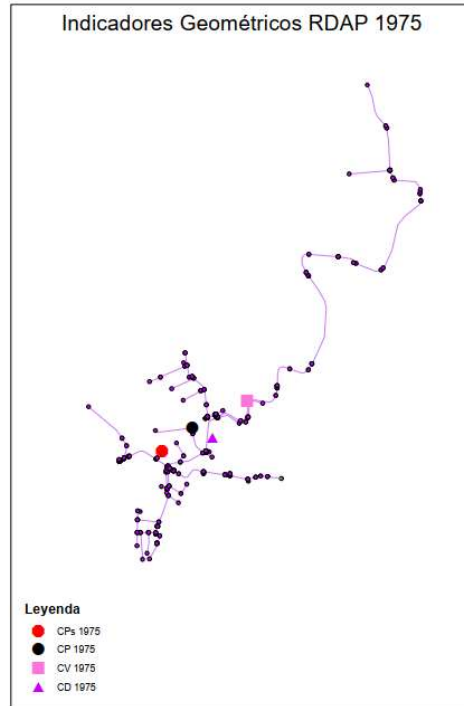
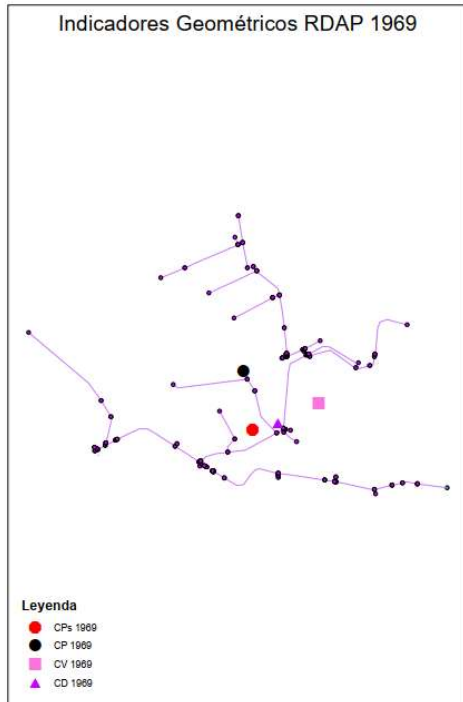
Tabla 11 Factores de Multiplicación

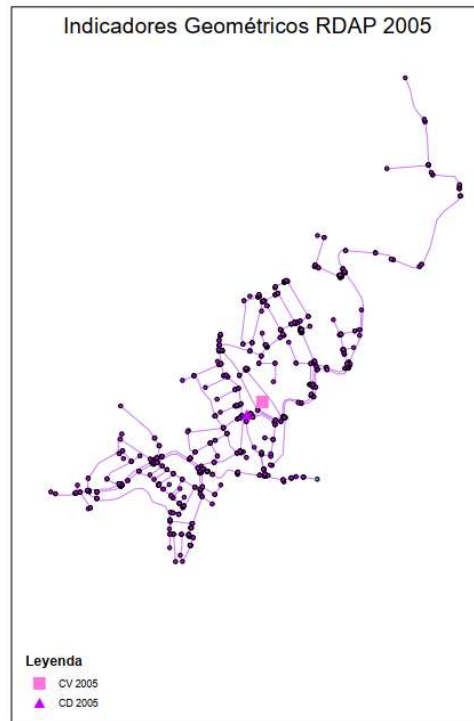
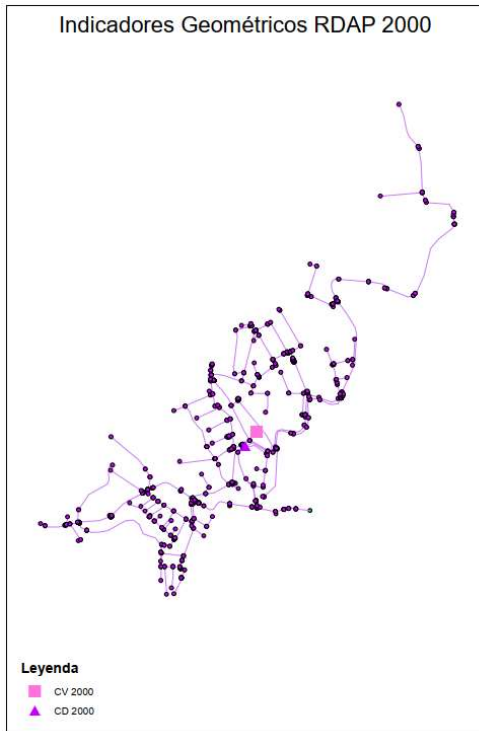
• Indicadores Geométricos:

Año	VOLUME CENTROID (m)		SPECIFIC POWER CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)		POWER CENTROID (m)	
	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y
1969	101078.225	98393.3916	100991.213	98357.8423	101024.564	98367.0667	100979.109	98435.9447
1975	101149.731	98504.3203	100996.234	98359.5258	101049.78	98399.2055	100992.989	98427.7397
1980	101105.838	98499.1987	(-)	(-)	101060.756	98443.9796	(-)	(-)
1990	101102.264	98503.2188	100952.247	98314.0916	101068.101	98461.8841	101035.791	98488.6536
2000	101099.582	98501.007	(-)	(-)	101067.514	98461.7318	(-)	(-)
2005	101093.944	98498.2788	(-)	(-)	101049.361	98464.6273	(-)	(-)
2009	101088.458	98493.4259	101032.487	98494.5315	101059.132	98470.3356	101245.112	98757.7383

Tabla 12 Indicadores Geométricos Sector 25

Los centroides de la RDAP que se representa por medio del Sector Hidráulico 25, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 15 se puede observar que la variación de C_d , C_v es mínima a partir de año 1975. Con respecto a C_p y C_p s la mayor variación es de aproximadamente 270 metros y se presenta entre los años 1990 y 2009.





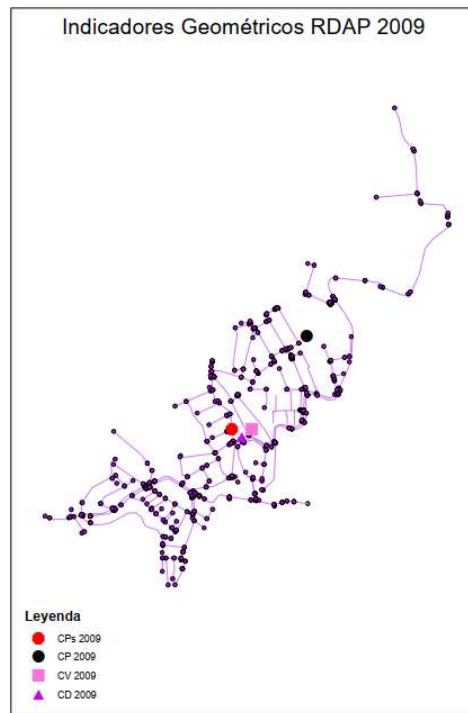


Figura 15 Ubicación Indicadores Geométricos Sector 25

- *Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})*

Año	\bar{D}
1969	6.96
1975	5.36
1980	5.54
1990	5
2000	5.06
2005	4.9
2011	4.8

Tabla 13 (\bar{D})

Durante el paso del tiempo la RDAP del Sector 25 mantiene su función principal de distribución.

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1969	1975	1980	1990	2000	2005	2009
	E	137	213	384	458	481	577	640
	V	136	211	375	447	466	552	610
Conectividad	q	0.01492	0.00961	0.005475	0.00459	0.00443	0.00379	0.003445
	k	2.01470	2.01895	2.048	2.04921	2.06437	2.09057	2.098360
	MC	0.00749	0.00719	0.013422	0.01349	0.01725	0.02365	0.025514
Eficiencia	d	62	75	89	93	85	89	86
	It	20.9167	25.2814	35.02114	36.3772	32.1251	34.8073	32.90335
Centralidad	Cb	0.43432	0.48264	0.525703	0.55113	0.46839	0.53532	0.517219
	Cc	0.05069	0.04234	0.030168	0.02914	0.03306	0.03032	0.032018
Diversidad	h	0.29587	0.28986	0.273262	0.28197	0.28948	0.28049	0.286496
Robustez	$\Delta\lambda$	0.018	0.115	0.0583	0.0328	0.0265	0.0175	0.01759293

Tabla 14 Indicadores de Teoría de Grafos

- Branch Index

Año	BI
1969	0.8515
1975	0.8523
1980	0.7671
1990	0.7901
2000	0.7417
2005	0.6346
2009	0.6222

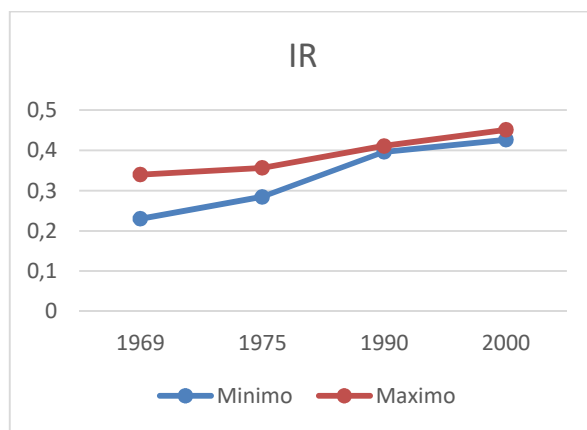
Tabla 15 Branch Index

Observando los resultados de Branch Index, el Sector 25 se puede clasificar como una red ramificada.

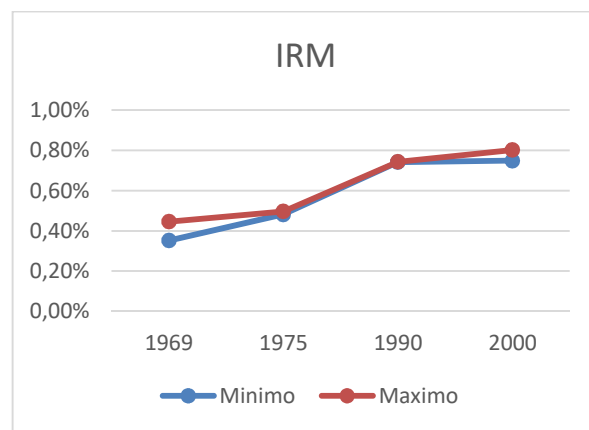
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1969	1975	1990	2000
IR	Mínimo	0.2300507	0.28435147	0.39617726	0.42629364
	Máximo	0.33974946	0.35636818	0.41069552	0.45082137
IRM	Mínimo	0.35%	0.48%	0.74%	0.75%
	Máximo	0.45%	0.50%	0.74%	0.80%
PPC	Mínimo	72.48%	76.23%	75.71%	74.23%
	Máximo	74.85%	77.80%	75.74%	76.11%
E	Mínimo	3.99981332	4.59345913	5.94386959	5.898015499
	Máximo	4.68294382	5.19804287	5.96527338	6.514120102

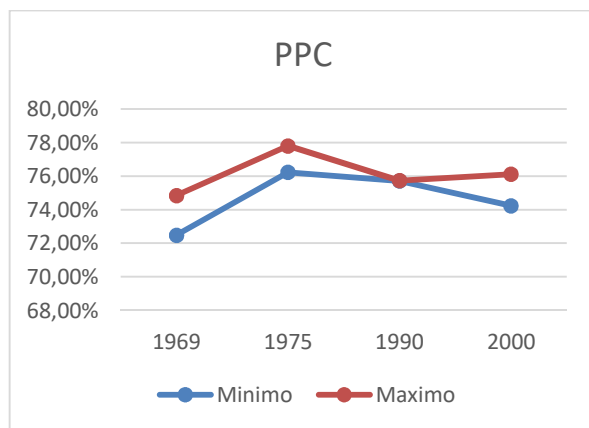
Tabla 16 Indicadores de Rendimiento Hidráulico



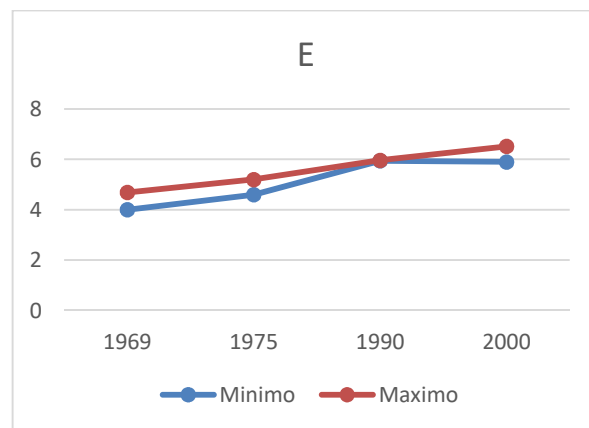
Gráfica 17 Índice de Resiliencia



Gráfica 18 Índice de Resiliencia Modificada



Gráfica 19 Índice de Potencia Especifica



Gráfica 20 Entropía

6.1.2 Cali

El detalle de la RDAP de Santiago de Cali se puede ver con detalle en la Figura 16.

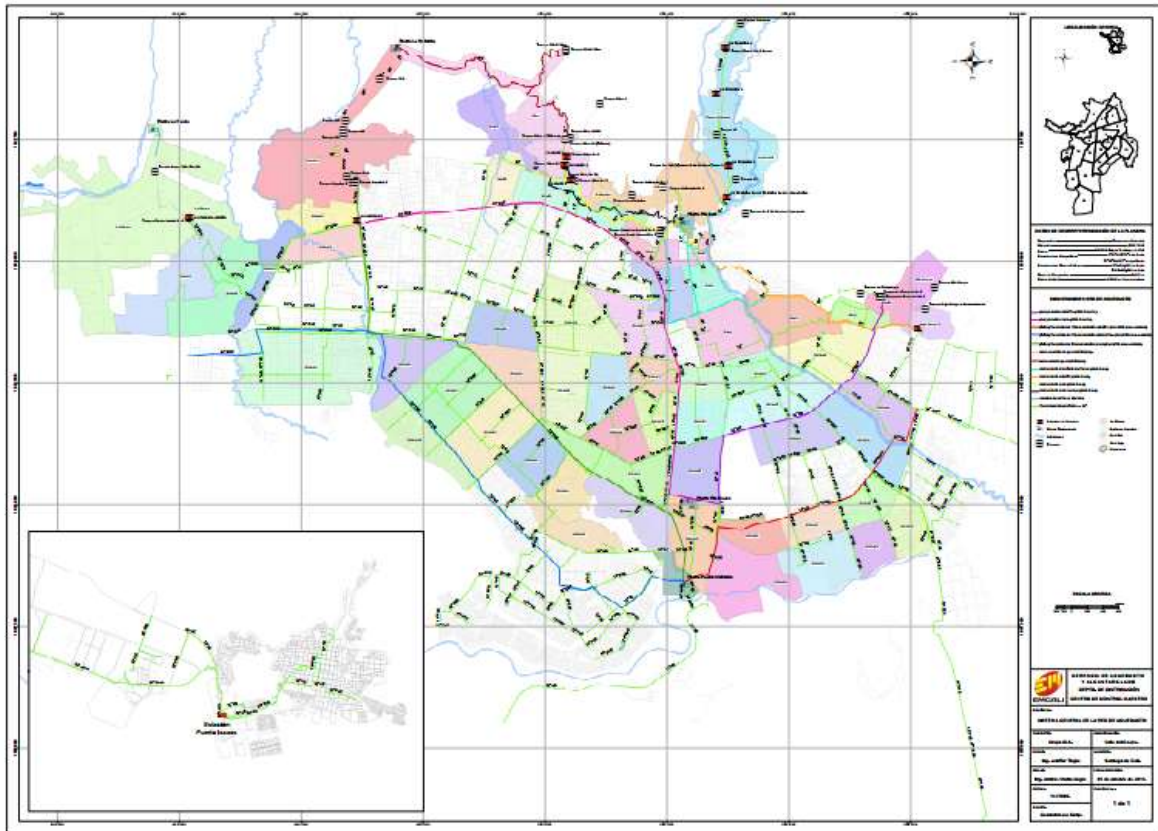


Figura 16 Red Distribución de Agua Potable de Santiago de Cali

6.1.2.1 RBS-19

Santiago de Cali está conformado por 22 comunas, el sector hidráulico RBS -19, está ubicado en la Comuna No. 10 y suministra agua potable a los barrios: Las granjas, El Guabal, San Judas Tadeo 2, San Judas Tadeo 1 y la Selva. Los anteriores barrios están clasificados en la escala de estratificación socio económica como estrato 3 (Secretaría de Desarrollo Territorial y Bienestar, 2017).

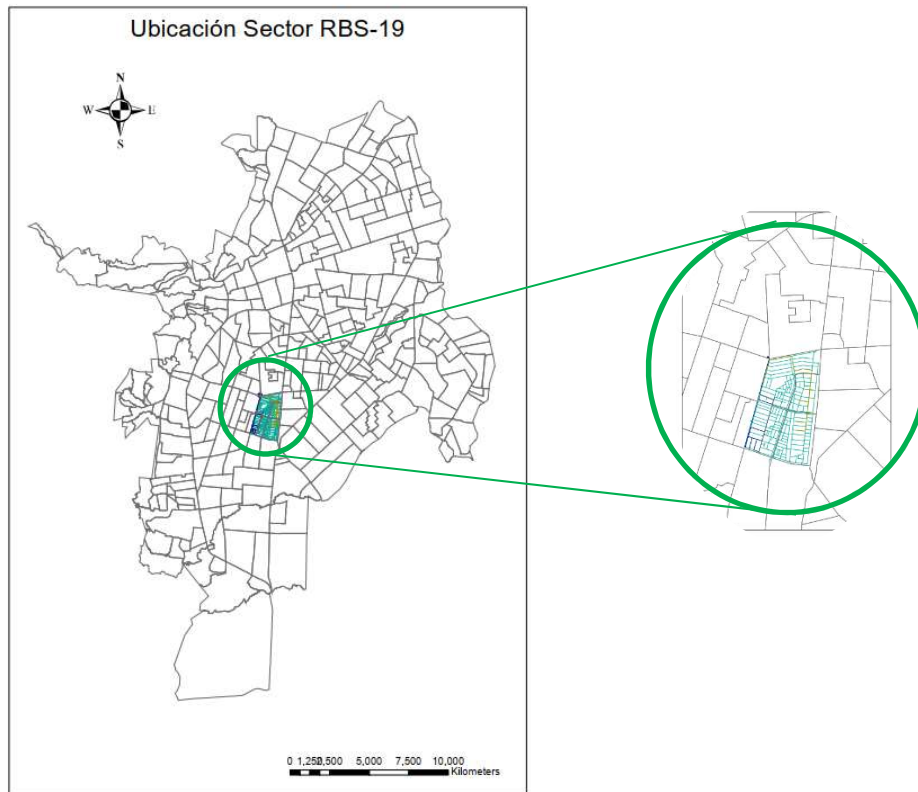
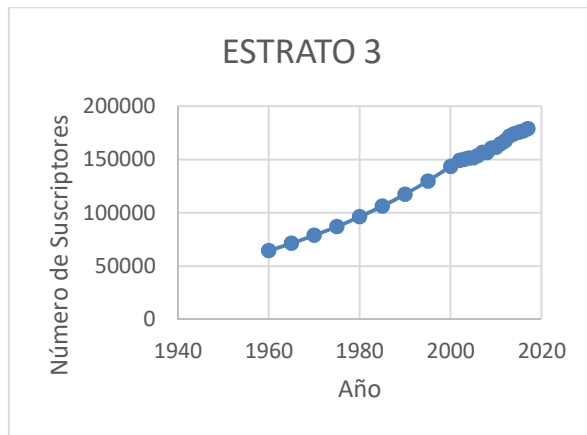
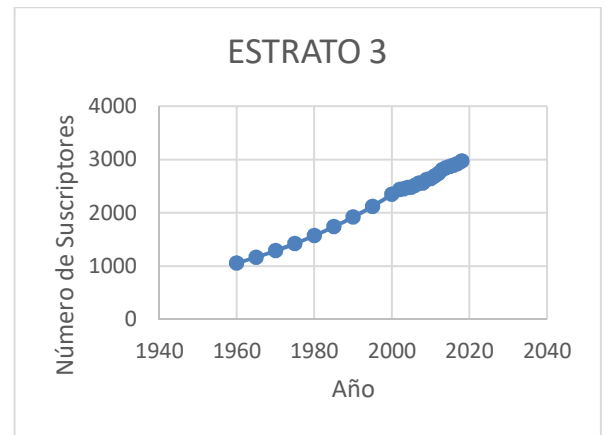


Figura 17 Ubicación Sector RBS-19

- Proyección de Población:

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población proyectada para el año 2017 en la ciudad de Cali, (2420013) (DANE 2011) y la población que habitaba en cada uno de los barrios mencionados en el numeral anterior (39555) (Secretaría de Desarrollo Territorial y Bienestar, 2017), de esta manera se obtuvo un factor de multiplicación de 0.0163 y se obtuvo el aproximado del número de suscriptores en la zona de estudio. Lo anterior se puede observar en la Gráfica 21 y Gráfica 22.


Gráfica 21 Número total de Suscriptores

Gráfica 22 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del RBS-19 el método que más se ajustó fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2014 fue de 42.81 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 17:

Año	<i>Caudal total</i> _{ayer} *	Factor de Multiplicación
1965	4.48	3.916
1968	10.69	1.813
1975	16.35	1.310
1978	17.81	1.329
1985	23.34	1.120
1989	26.51	1.090
1995	39.41	0.810
1999	40.67	0.868
2009	41.06	0.962

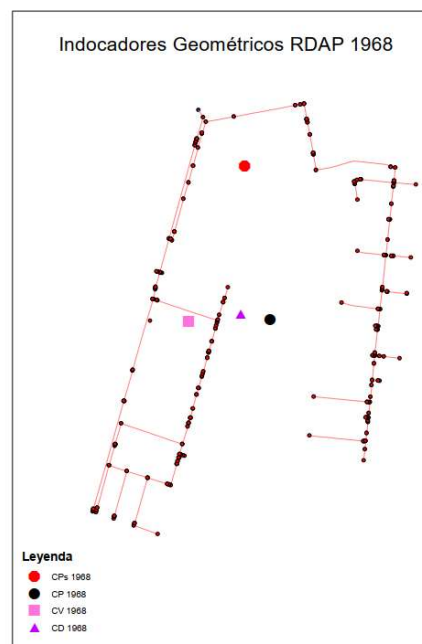
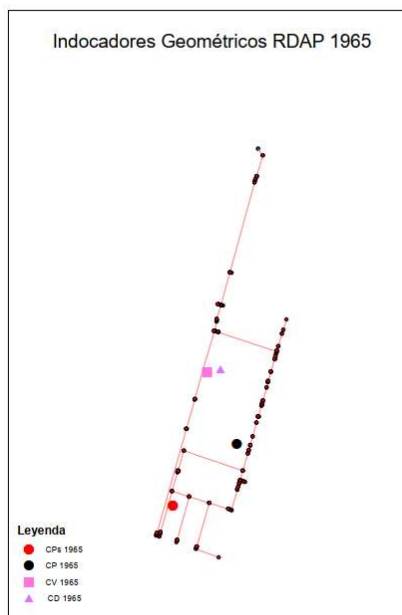
Tabla 17 Factores de Multiplicación

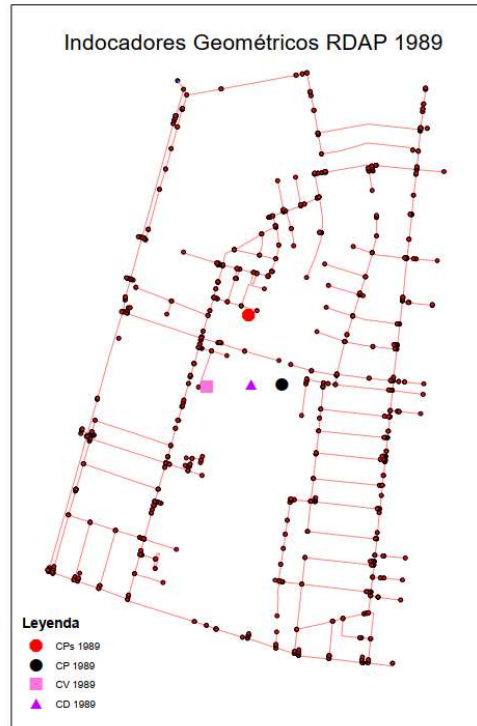
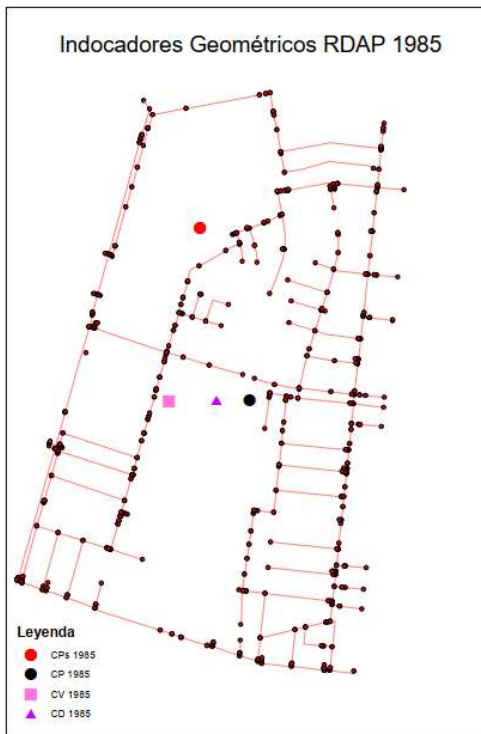
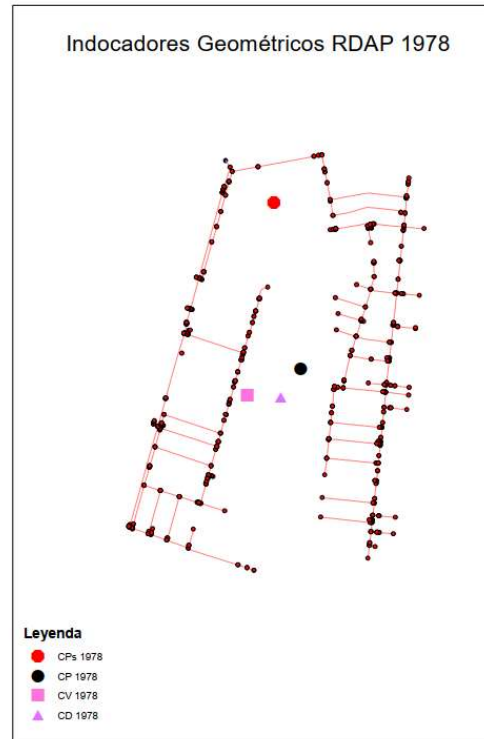
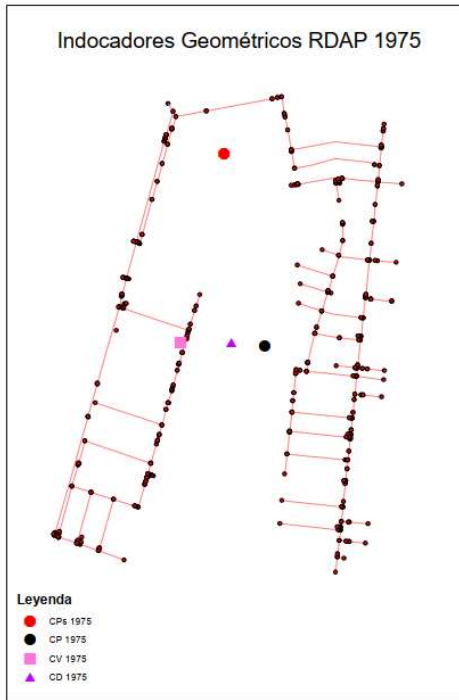
• Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		SPECIFIC POWER CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)		POWER CENTROID (m)	
	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y
1965	1060977.53	869083.956	1060874.6	868682.055	1061017.8	869092.214	1061066.95	868865.487
1968	1061101.83	869142.326	1061264.31	869593.42	1061253.11	869164.85	1061338.26	869148.506
1975	1061164.43	869111.227	1061282.95	869622.06	1061302.08	869113.239	1061392.75	869104.11
1978	1061199.19	869011.402	1061283.31	869623.155	1061304.45	869004.2	1061369.08	869092.703
1985	1061192.41	869025.844	1061267.81	869447.982	1061307.48	869028.869	1061388.12	869029.284
1989	1061199.57	869028.841	1061298.15	869199.904	1061304.09	869035.258	1061377.05	869041.899
1995	1061224.64	869009.819	1061156.82	869266.344	1061307.48	869004.168	1061352.7	869030.539
1999	1061230.75	869011.036	1061122.21	869251.495	1061314.75	869008.77	1061358.08	869037.207
2009	1061233.72	869010.632	1061117.69	869226.824	1061317.3	869007.17	1061357.1	869042
2014	1061241.26	869042.448	1061120.61	869516.356	1061319.83	869054.173	1061360.17	869067.035

Tabla 18 Indicadores Geométricos RBS-19

Los centroides del sector RBS- 19, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 18 se puede observar que la variación máxima de todos los indicadores geométricos se presenta entre los años 1965 y 1968, esto se debe a que en este periodo de tiempo es cuando la red tuvo un porcentaje de desarrollo casi del 12%.





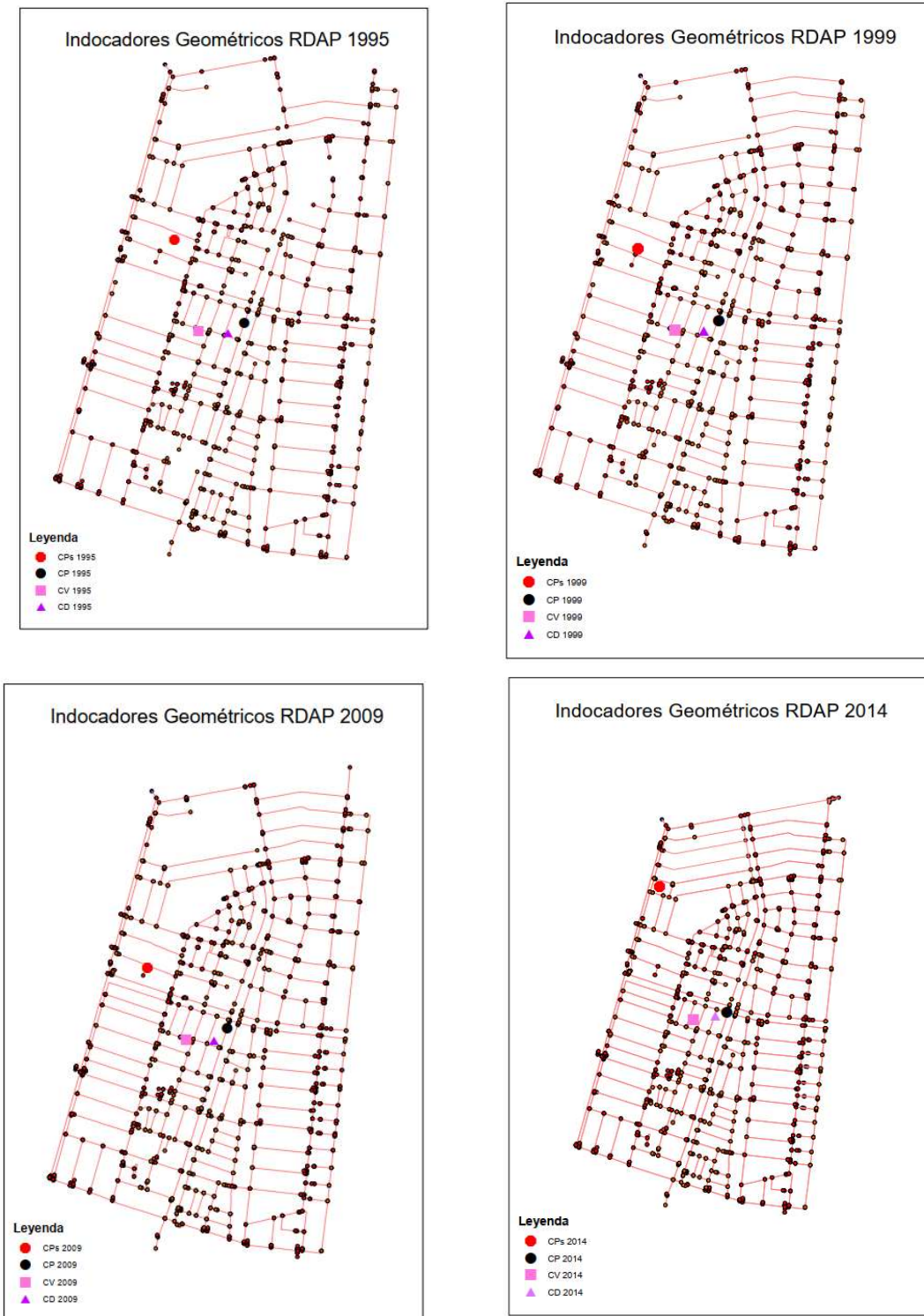


Figura 18 Ubicación Indicadores Geométricos RBS-19

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	\bar{D}
1965	10.83
1968	8
1975	6.8
1978	6.9
1985	6.5
1989	6.2
1995	5.4
1999	5.3
2009	5.2
2014	5.2

Tabla 19 \bar{D}

En la Tabla 19 \bar{D} se puede observar el cambio de la funcionalidad de la red con el tiempo, pasado gradualmente de ser una red de transmisión a una red de distribución.

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1965	1968	1975	1978	1985	1989	1995	1999	2009	2014
	E	203	307	338	450	525	864	917	950	1003	203
	V	202	299	327	431	498	754	788	810	850	202
Conectividad	q	0.02882	0.0999	0.0068	0.0063	0.00485	0.00424	0.00303	0.0029	0.0028	0.0027
	k	2.02	2	2.05	2.06	2.08	2.1	2.28	2.319	2.33	2.35
	MC	0.0104	0.005	0.0151	0.0184	0.0233	0.0282	0.071	0.0808	0.085	0.089
Eficiencia	D	32	86	99	93	64	65	55	51	52	55
	Lt	14.03	33.07	36.84	36.5	29.92	30.16	22.45	21.19	21.18	21.03
Centralidad	Cb	0.381	0.377	0.436	0.434	0.247	0.279	0.267	0.287	0.28	0.3
	Cc	0.07324	0.031	0.0281	0.0282	0.0336	0.0334	0.04	0.048	0.048	0.04
Diversidad	H	0.309	0.301	0.339	0.339	0.3399	0.347	0.311	0.302	0.299	0.289
Robustez	$\Delta\lambda$	0.1929	0.1345	0.061	0.0083	0.0522	0.074	0.106	0.107	0.107	0.134

Tabla 20 Indicadores de Teoría de Grafos RBS-19

- Branch Index

Año	BI
1965	0.7679
1968	0.9188
1975	0.7259
1978	0.7232
1985	0.6065
1989	0.5937
1995	0.337
1999	0.2907
2009	0.2643
2014	0.2369

Tabla 21 Branch Index

En la Tabla 21, se puede observar como la RDAP en 1965 se clasifica como una red ramificada y media de pasa el tiempo se van formando circuitos pasando a ser una red con características de maya.

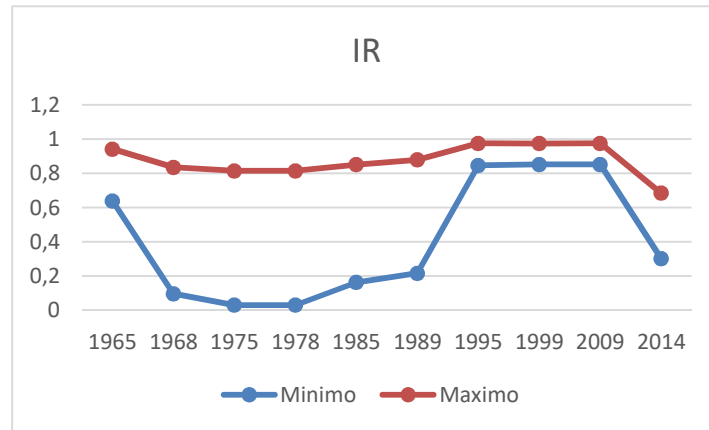
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1965	1968	1975	1978	1985
IR	Mínimo	0.6385628	0.0964510	0.0301224	0.0301224	0.1629342
	Máximo	0.9421441	0.8351219	0.8143714	0.8143714	0.8509495
PPC	Mínimo	78.85%	58.17%	43.41%	43.41%	62.53%
	Máximo	96.81%	92.12%	89.07%	89.07%	93.02%
E	Mínimo	2.3851575	2.9732976	4.1248550	4.1248550	4.079625
	Máximo	2.38587761	2.97427177	4.12591648	4.1259164	4.080609

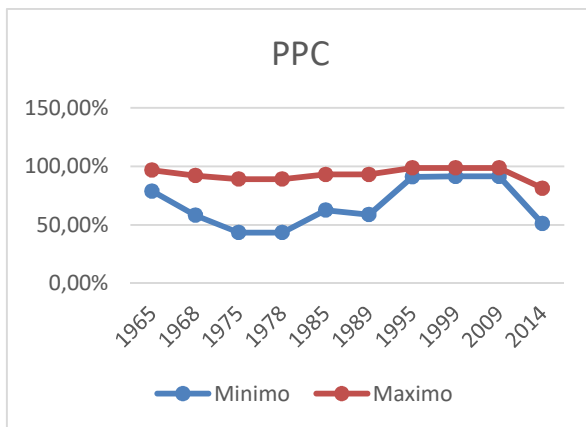
Indicadores Hidráulicos/Año		1985	1989	1995	1999	2009	2014
IR	Mínimo	0.16293424	0.21656513	0.84656572	0.85196394	0.8524313	0.30253455
	Máximo	0.85094953	0.87898141	0.97519559	0.97479749	0.97511053	0.68427706
PPC	Mínimo	62.53%	58.74%	91.08%	91.39%	91.44%	51.10%
	Máximo	93.02%	93.02%	98.64%	98.68%	98.69%	81.28%
E	Mínimo	4.07962513	4.34153938	4.76452541	4.87726974	4.91662693	5.03694105

	Máximo	4.08060932	4.34456778	4.76636124	4.87909174	4.91861868	5.03860474
--	---------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

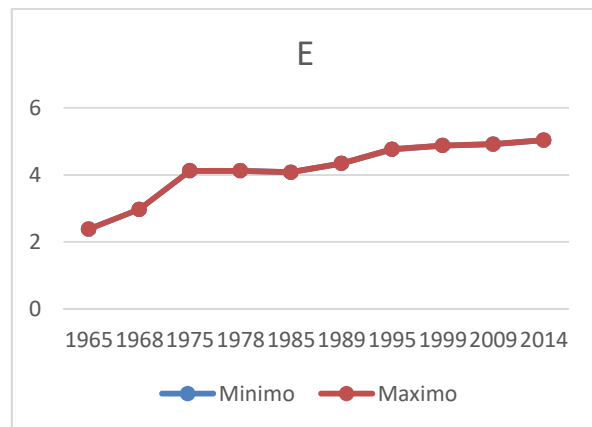
Tabla 22 Indicadores de Rendimiento Hidráulico RBS-19



Gráfica 23 Indicador de Resiliencia



Gráfica 24 indicador de Potencia Específica



Gráfica 25 Entropía

6.1.2.2 RBS-22

El Sector RBS-22 está ubicado entre la Comuna 15 y 16. Este sector suministra agua potable los barrios: Republica de Israel, Mariano Ramos y Ciudad Córdoba. La ubicación del sector RBS-22 se puede observar en la Figura 19.

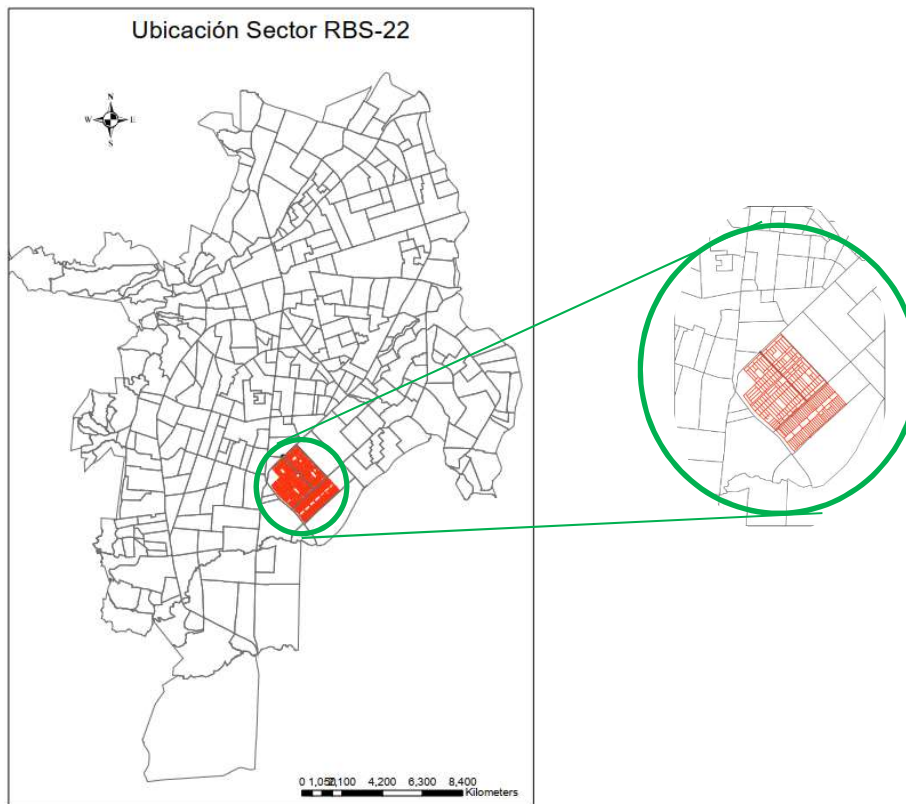
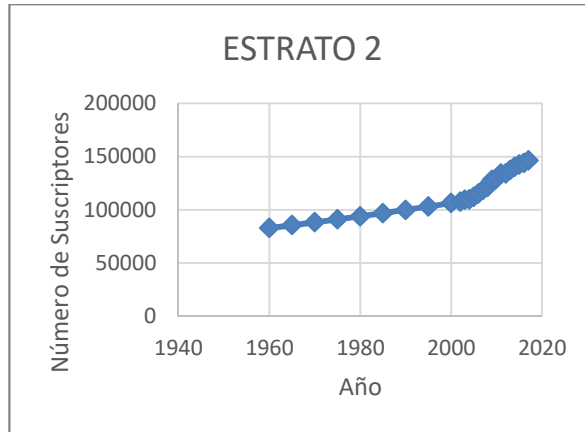


Figura 19 Ubicación RBS-22

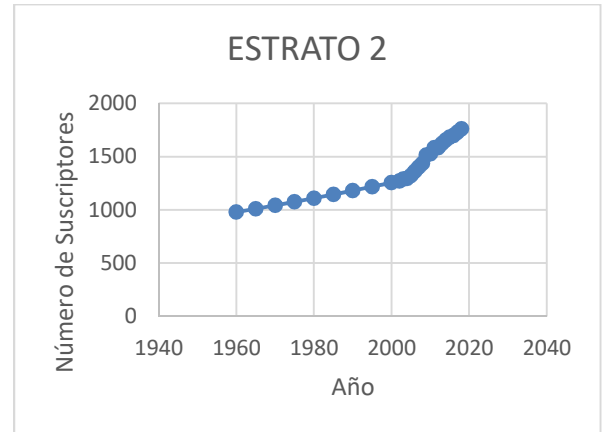
- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población proyectada para el año 2017 en la ciudad de Cali, (2420013) (DANE 2011) y la población que habitaba en cada uno de los barrios mencionados en el numeral anterior. Los barrios República de Israel y Mariano Ramos, están clasificados según la escala de estratificación socioeconómica en el estrato 3, la población de estos 2 barrios en el año 2017 era 40803 habitantes, al calcular la relación con la población de la ciudad de Cali en el año 2017 se obtuvo un factor de multiplicación igual a 0.01686.

Con respecto al barrio Ciudad Córdoba, está clasificado como



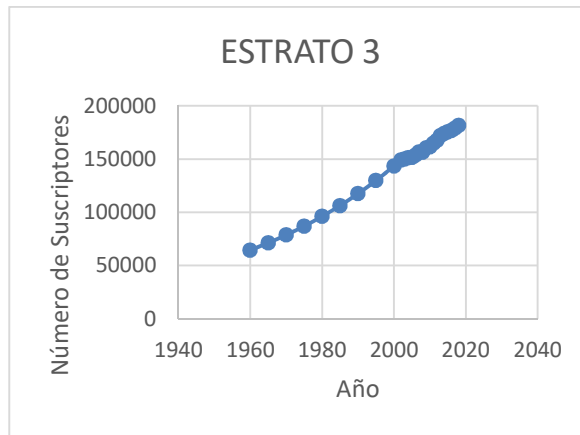
Gráfica 26 Número total de Suscriptores



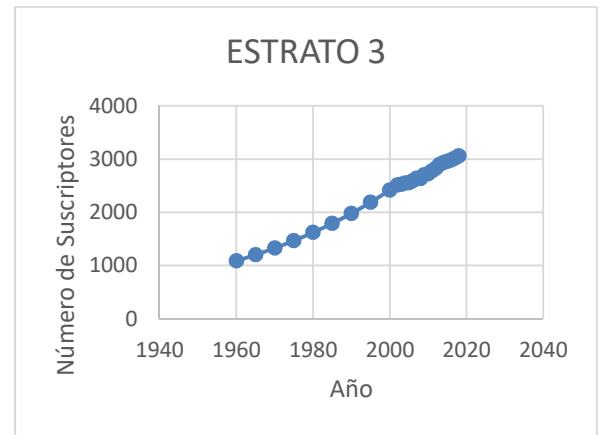
Gráfica 27 Número de Suscriptores

un barrio de estrato 3 con un total de población para el año 2017 de 28577 habitantes, al aplicar la relación mencionada en el párrafo anterior, se obtuvo un factor de multiplicación de 0.011808.

Para el caso de la proyección de suscriptores del RBS-22 el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.



Gráfica 28 Número total de Suscriptores



Gráfica 29 Número de Suscriptores

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el

año 2017 fue de 79.68 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 23:

Año	<i>Caudal total_{ayer}*</i>	Factor de Multiplicación
1975	35.83	1.192
1985	49.48	0.997

Tabla 23 Factores de Multiplicación

- Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C_x	C_y	C_x	C_y
1975	1062350.12	868502.614	1062424.12	868340.031
1985	1062428.2	868362.059	1062539.48	868166.659
1995	1062574.8	868211.844	1062424.12	868340.031
2017	1062572.13	868208.686	1062666.66	868085.527

Tabla 24 Indicadores Geométricos RBS-22

Los centroides del sector RBS- 22, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 20 se puede observar que la variación máxima de todos los indicadores geométricos se es mínima, esto se debe a el mayor desarrollo de la red se presentó en el año 1975.



Figura 20 Ubicación Indicadores Geométricos RBS-22

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1975	4.18
1985	4.42
1995	4.367
2017	4.4

Tabla 25 \bar{D}

La función principal del sector RBS 22 es netamente de distribución a lo largo del paso de los años.

- Teoría de Grafos

Indicador/Año		1975	1985	1995	2017
	E	588	849	1391	1542
	V	496	734	1185	1284
	q	0.00478	0.0031	0.0019	0.00187
Conectividad	k	2.37	2.31	2.34	2.4
	MC	0.09422	0.0792	0.0875	0.1
	d	69	98	60	59
Eficiencia	It	23.667	32.2	26.12	25.323
	Cb	0.453	0.462	0.391	0.359
Centralidad	Cc	0.0857	0.032	0.039	0.0404
	Diversidad	h	0.331	0.327	0.321
Robustez	$\Delta\lambda$	0.085	0.085	0.042	0.0511

Tabla 26 Indicadores de Teoría de Grafos

- Branch Index

Año	BI
1975	0.2992
1985	0.3621
1995	0.2862
2017	0.1858

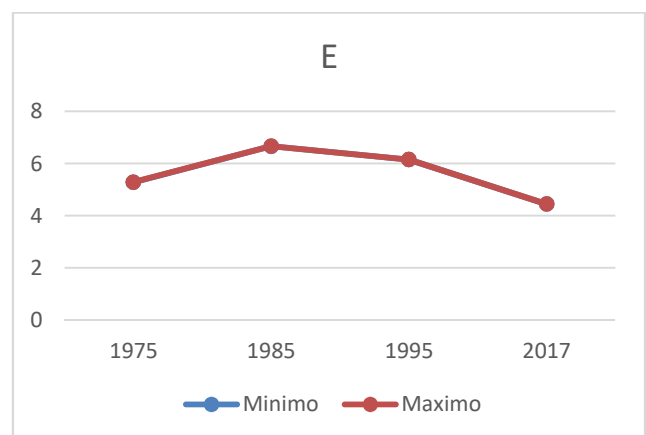
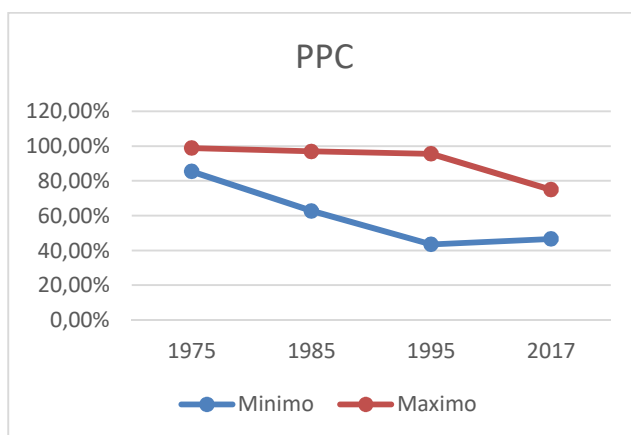
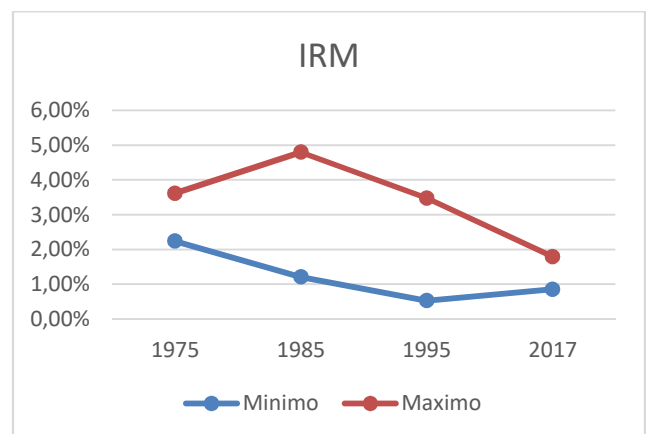
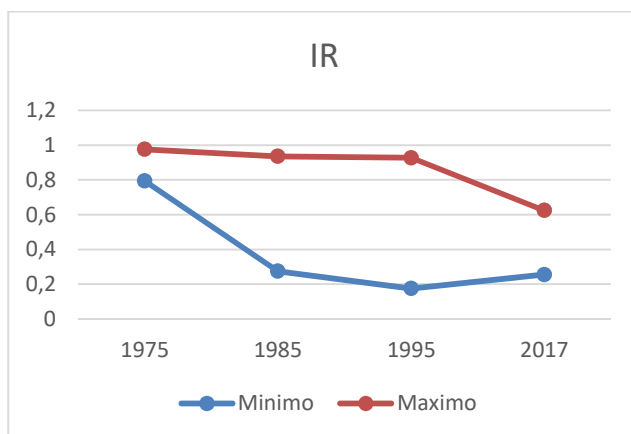
Tabla 27 Branch Index

En la Tabla 27, se puede observar con claridad que la RDAP estructura de la red está calificada dentro de las redes compuestas por circuitos.

• Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1975	1985	1995	2017
IR	Mínimo	0.79355311	0.27456427	0.17535186	0.25541824
	Máximo	0.97608972	0.93537354	0.92702782	0.62458521
IRM	Mínimo	2.24%	1.21%	0.53%	0.85%
	Máximo	3.61%	4.80%	3.48%	1.79%
PPC	Mínimo	85.49%	62.74%	43.50%	46.67%
	Máximo	98.86%	96.94%	95.61%	74.99%
E	Mínimo	5.28155613	6.66176462	6.15104103	4.44630241
	Máximo	5.2838583	6.6652317	6.15412569	4.44813251

Tabla 28 Indicadores de Rendimiento Hidráulico RBS-22



6.1.3 Manizales

6.1.3.1 Bajo Rosales:

Manizales está compuesta por 10 comunas, el sector hidráulico Bajo Rosales está ubicado en la comuna Palo grande y suministra el servicio de agua potable a el barrio Rosales. Este barrio está clasificado dentro de la estratificación socio económica, como un barrio estrato 6. La ubicación del sector Bajo Rosales se puede observar en la Figura 21.

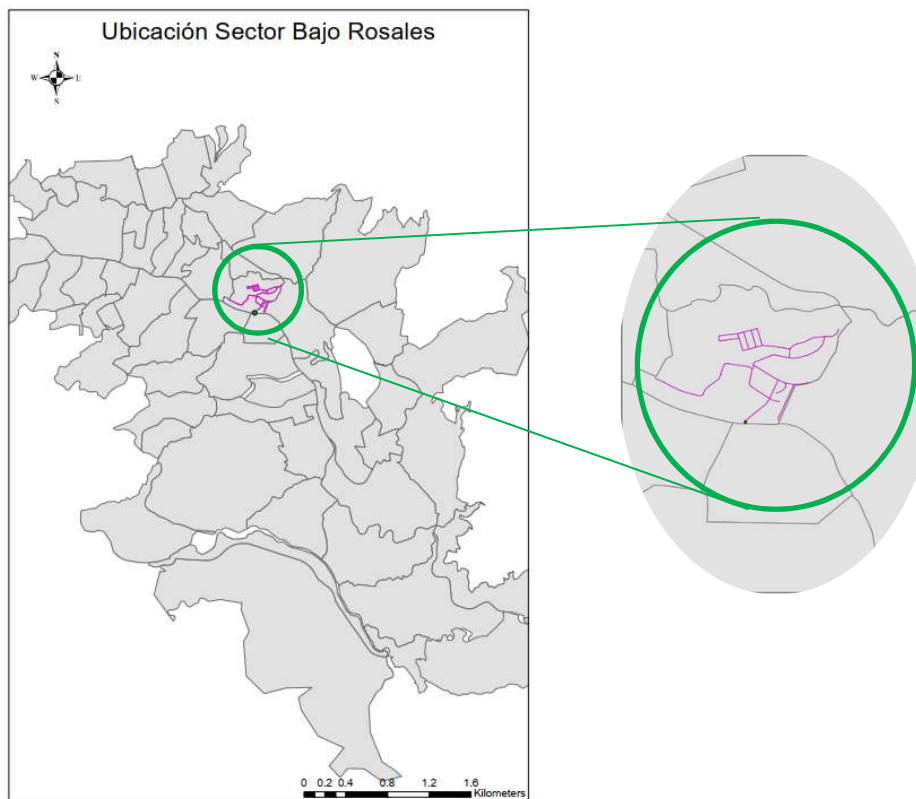
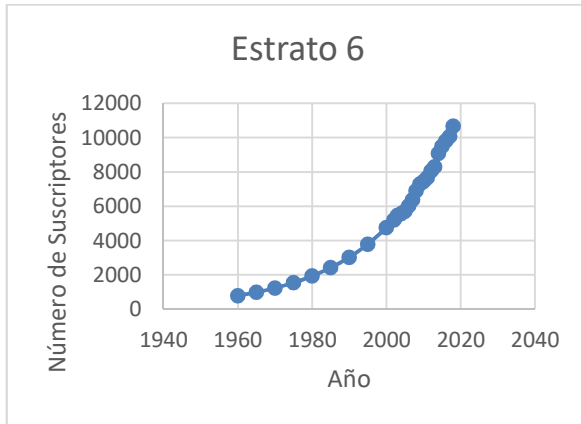


Figura 21 Ubicación del Bajo Rosales

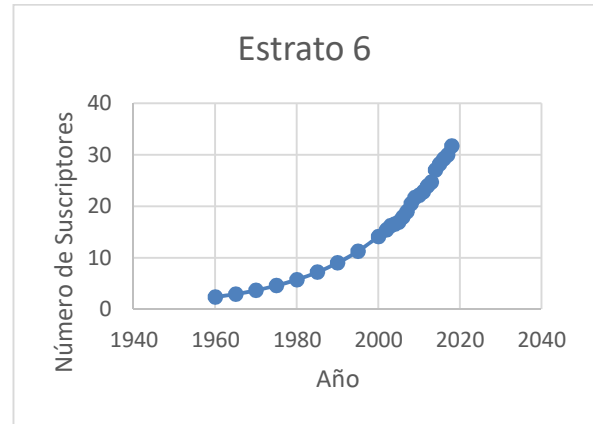
- Proyección Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población en Manizales en el censo de 1993, (327663)

(DANE, 1993) y la población que habitaba en el barrio Los Rosales, en el mismo año (1974). A partir de lo anterior se obtuvo un factor de multiplicación de 0.0029.



Gráfica 34 Número total de Suscriptores



Gráfica 35 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del Bajo Rosales, el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2013 fue de 1.723 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la tabla x:

Año	$Caudal\ total_{ayer}^*$	Factor de Multiplicación
1977	0.9498	0.422
1990	1.216	0.517

Tabla 29 Factor de Multiplicación

• Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y
1977	1176093.29	1051716.39	1176085.9	1051707.9
1990	1176124.04	1051739.43	1176123.11	1051737.16
2013	1176107.02	1051769.26	1176110.58	1051766.84

Tabla 30 Indicadores Geométricos Bajo Rosales

Los centroides del sector Bajo Rosales fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 22 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.

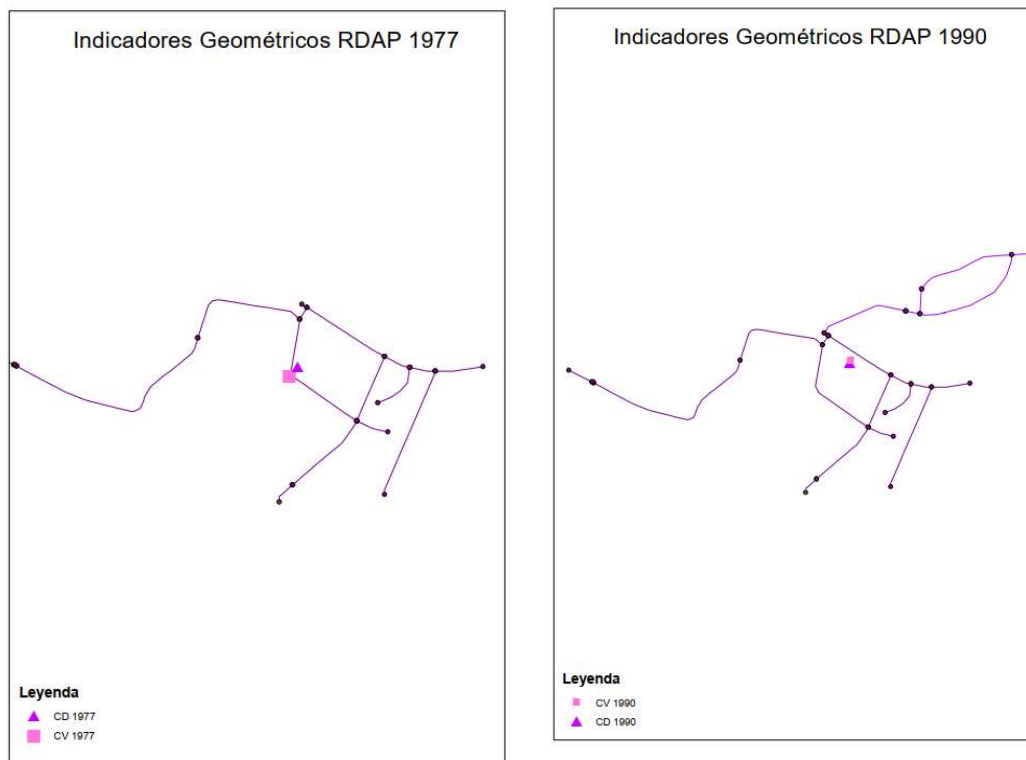


Figura 22 Ubicación de los Indicadores Geométricos Bajo Rosales

• Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1977	2.97
1990	2.91
2013	2.88

Tabla 31 \bar{D}

La función principal del sector Bajo Rosales es distribuir.

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1977	1990	2013
	E	18	25	37
	V	18	24	32
Conectividad	q	0.117647059	0.09057971	0.072580645
	k	2	2.083333333	2.25
	MC	0.032258065	0.046511628	0.084745763
Eficiencia	d	9	11	14
	It	3.862745098	4.898550725	6.165322581
Centralidad	Cb	0.308823529	0.351263104	0.397225113
	Cc	0.287628861	0.224100438	0.173926526
Diversidad	h	0.514495755	0.445733397	0.407027084
Robustez	$\Delta\lambda$	0.630955055	0.265065	0.162973572

Tabla 32 Indicadores de Teoría de Grafos Bajo Rosales

- Branch Index

Año	BI
1977	0.7778
1990	0.6364
2013	0.4412

Tabla 33 Branch Index

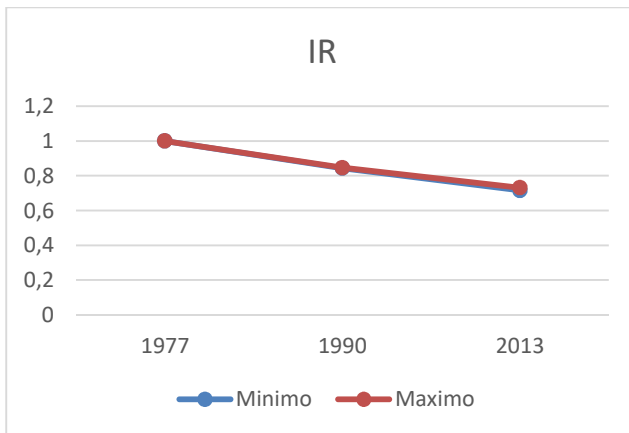
La RDAP del sector Bajo rosales, empieza siendo ramificada y con el paso del tiempo se van formando circuitos, pasando a ser una red tipo maya.

- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

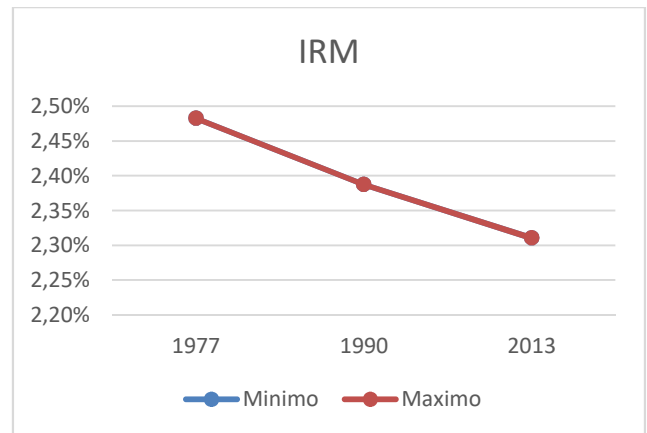
Indicadores Hidráulicos/Año		1977	1990	2013
IR	Mínimo	0.99958533	0.843292	0.71516764

	Máximo	0.99992216	0.84621465	0.73158276
IRM	Mínimo	2.48%	2.39%	2.31%
	Máximo	2.48%	2.39%	2.31%
PPC	Mínimo	99.97%	91.06%	82.46%
	Máximo	99.99%	92.70%	85.78%
E	Mínimo	2.58034754	2.8078723	3.37274289
	Máximo	2.66362047	2.88784361	3.40853238

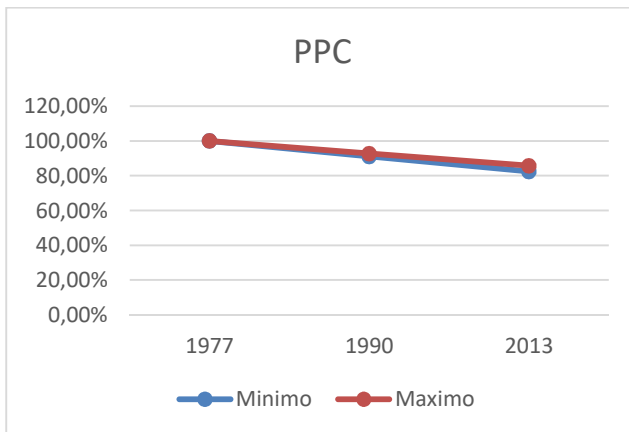
Tabla 34 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Bajo Rosales



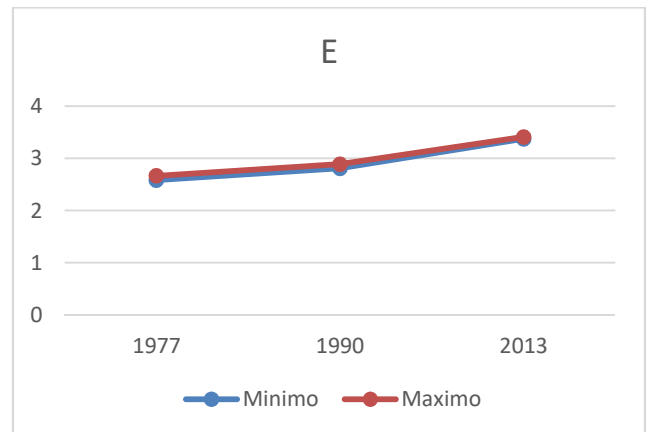
Gráfica 36 índice de Resiliencia



Gráfica 37 Índice de Resiliencia Modificado



Gráfica 38 Índice de Potencia Especifica



Gráfica 39 Entropía

6.1.3.2 Circuito 51

El sector hidráulico Circuito 51, está ubicado en la Comuna Estación y ofrece el servicio de agua potable a los barrios: El Sol y San Jorge, estos barrios están clasificados como barrios estrato 4. La ubicación del sector se puede observar en la Figura 23.

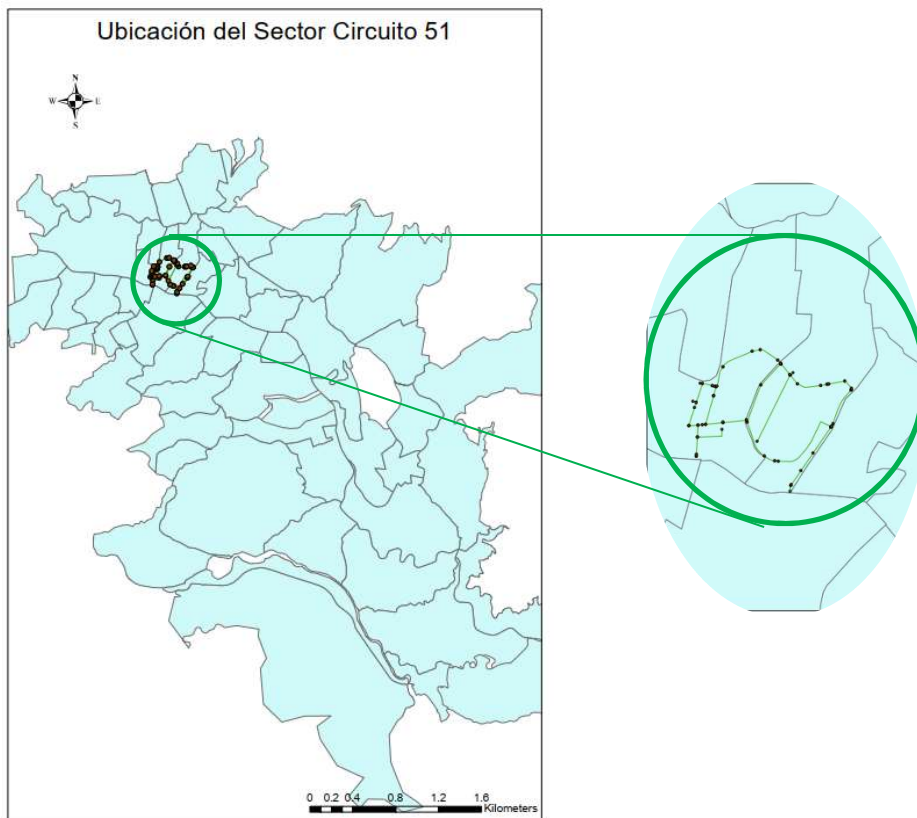
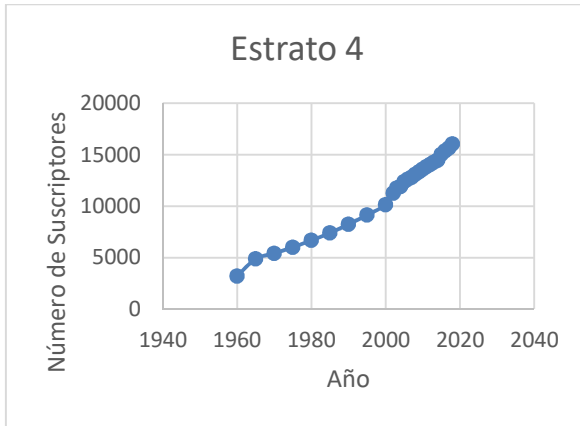
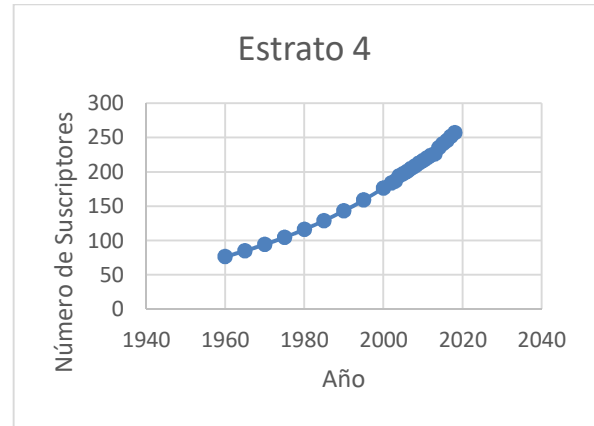


Figura 23 Ubicación Sector Circuito 51

- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población en Manizales en el censo de 1993, (327663) (DANE, 1993) y la población que habitaba en los barrios El Sol (1018) y San Jorge(4141). A partir de lo anterior se obtuvo un factor de multiplicación de 0.015.


Gráfica 40 Número total de Suscriptores

Gráfica 41 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del Circuito 51, el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2005 fue de 4.504 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 35:

Año	<i>Caudal total_{ayer}*</i>	Factor de Multiplicación
1960	0.78651344	0.787
1980	0.6465709	0.647

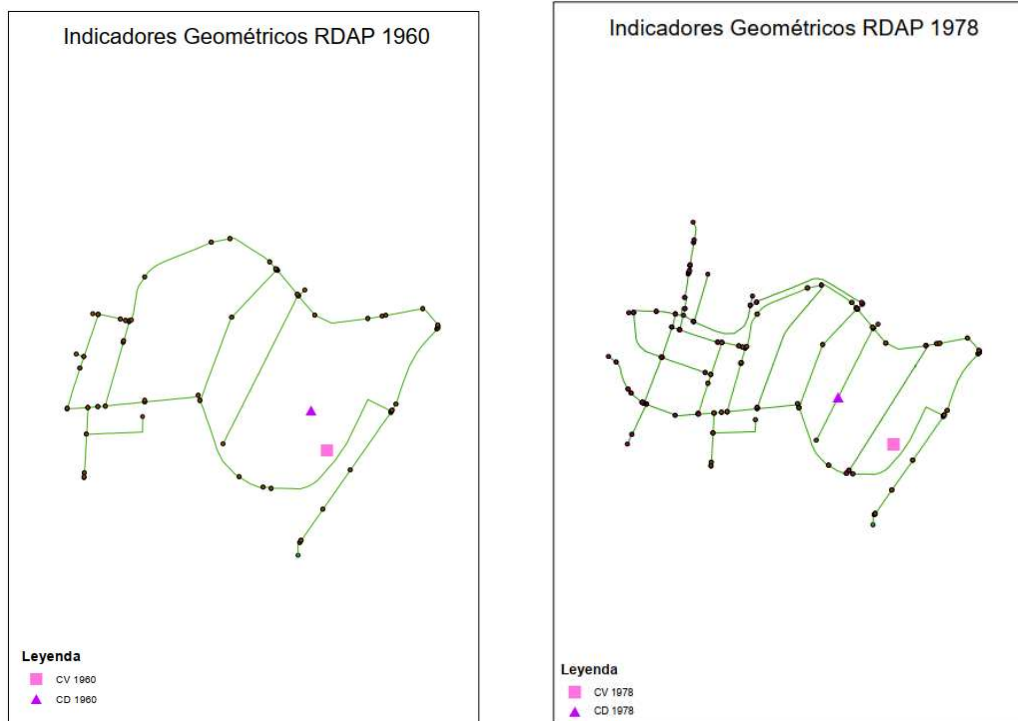
Tabla 35 Factor de Multiplicación

- Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y
1960	1175221.5	1052066.24	1175204.3	1052108.18
1978	1175219.15	1052067.17	1175141.84	1052132.47
1980	1175219.48	1052068.84	1175150.1	1052144.59
2005	1175208.68	1052063.76	1175138.7	1052131

Tabla 36 Indicadores Geométricos Circuito 51

Los centroides del sector Circuito 51 fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 24 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.



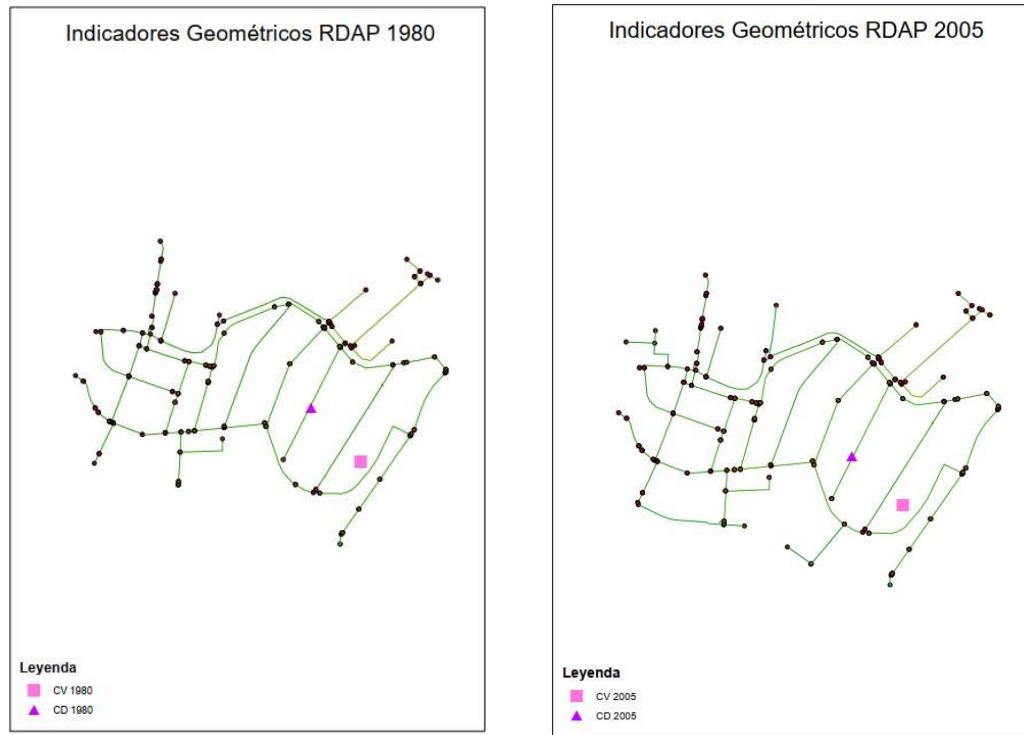


Figura 24 Ubicación de los Indicadores Geométricos Circuito 51

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1960	3.78
1978	3.29
1980	3.21
2005	3.18

Tabla 37 \bar{D}

La red tiene como función principal distribuir.

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1960	1978	1980	2005
E	64	111	127	136	64
V	63	105	119	128	63
Conectividad	q	0.032770097	0.02032967	0.018088591	0.016732283
	k	2.031746032	2.114285714	2.134453782	2.125
	MC	0.016528926	0.034146341	0.038626609	0.035856574
Eficiencia	d	21	33	34	34

	Indicador/Año	1960	1978	1980	2005
Centralidad	It	9.952892985	11.286	12.39068509	12.4039124
	Cb	0.465055185	0.373572772	0.42543752	0.432830083
	Cc	0.105925757	0.051840656	0.085062083	0.084796306
Diversidad	h	0.30581947	0.316698284	0.322313821	0.349372104
Robustez	$\Delta\lambda$	0.087115404	0.238177326	0.132893408	0.158080682

Tabla 38 Indicadores de Teoría de Grafos Circuito 51

- Branch Index

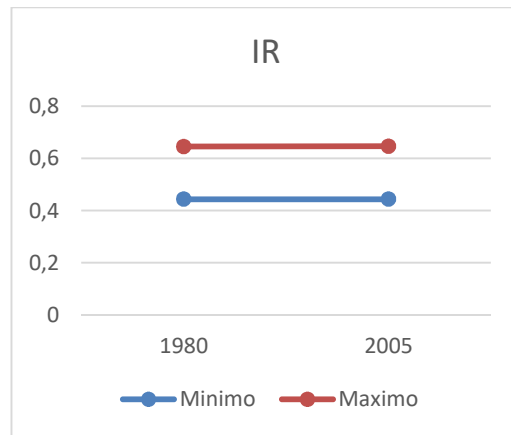
Año	BI
1960	0.6944
1978	0.6104
1980	0.6374
2005	0.6569

Tabla 39 Branch Index

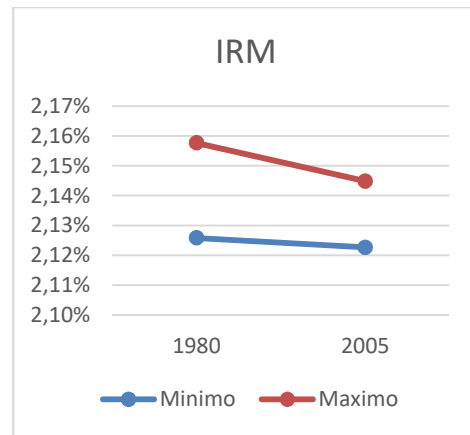
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1980	2005
IR	Mínimo	0.44331437	0.44341582
	Máximo	0.64522934	0.64640886
IRM	Mínimo	2.13%	2.12%
	Máximo	2.16%	2.14%
PPC	Mínimo	61.47%	61.58%
	Máximo	78.49%	78.63%
E	Mínimo	4.63472223	4.50047207
	Máximo	4.81059933	4.65914774

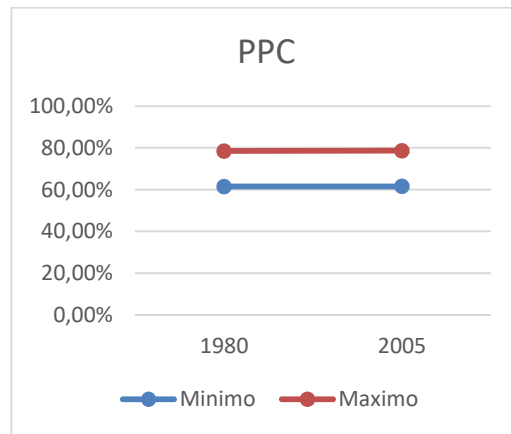
Tabla 40 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Circuito 51



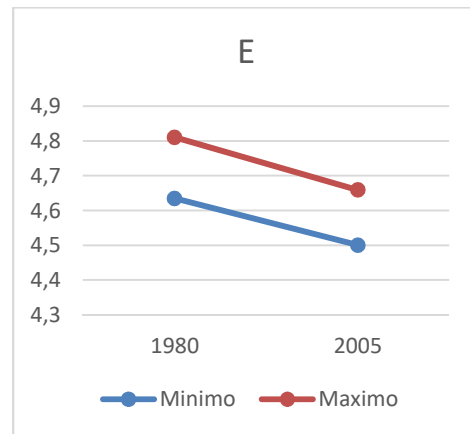
Gráfica 42 Índice Resiliencia



Gráfica 43 Índice de Resiliencia Modificado



Gráfica 44 Índice de Potencia Especifica



Gráfica 45 Entropía

6.1.3.3 Derivación Cond. El Cable-Fu:

El sector hidráulico Derivación Cond. El Cable-Fu fue el primer sector que se empezó a desarrollar en la ciudad de Manizales, este suministra agua potable a los barrios: Fundadores, Santa Helena, Uribe, San Jorge, Versalles, La Argentina, Arboleda, La Estrella y Palo grande. La estratificación socioeconómica de estos barrios esta entre el estrato 3 y el estrato 6. La ubicación del sector, se pueden observar en la Figura 25.

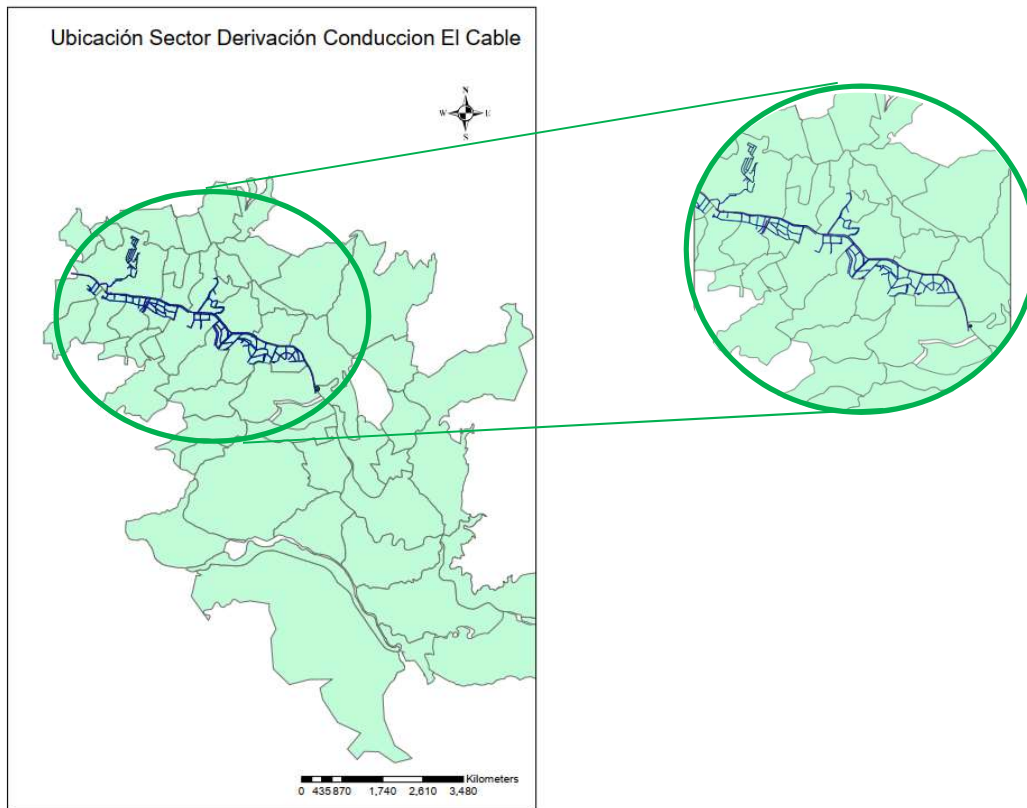
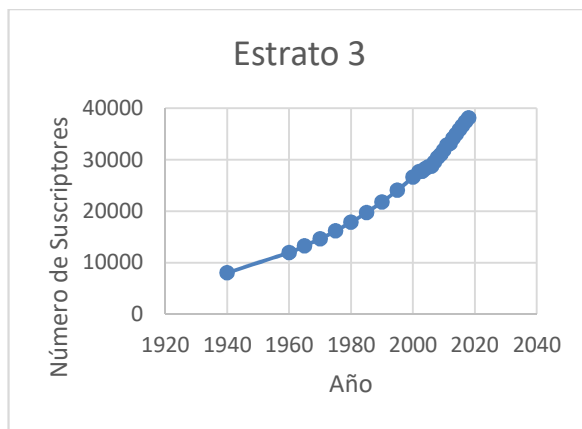


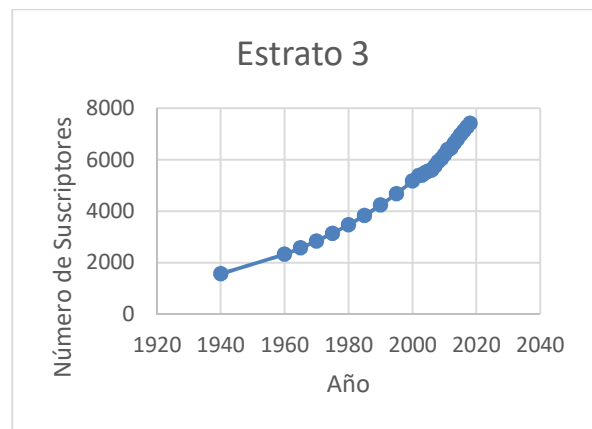
Figura 25 Ubicación del sector Derivación Cond. El Cable-Fu

- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población en Manzales en el censo de 1993, (327663) (DANE, 1993) y la población que habitaba en los barrio Fundadores (2767) , Santa Helena (19350), Uribe (41336) y San Jorge (272) en el mismo año, obteniendo un factor de multiplicación para el estrato 3 de 0.194.

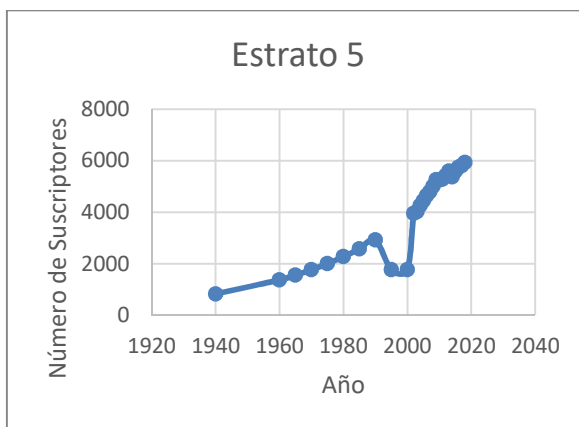


Gráfica 46 Número total de Suscriptores

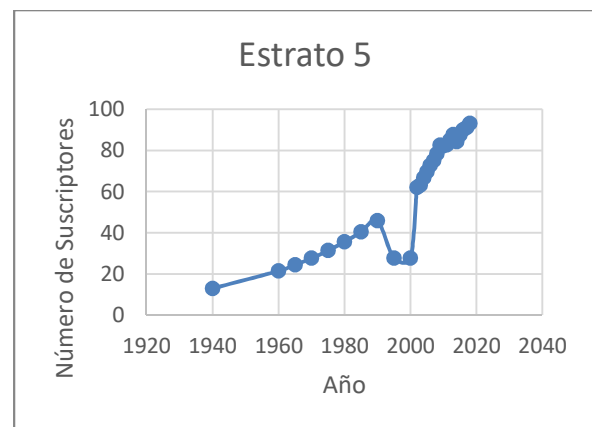


Gráfica 47 Número de Suscriptores

Para los barrios donde la clasificación de estratificación socioeconómica predominante es el estrato 5, es decir Versalles (2050), Arboleda (1556) y La Estrella (1531), se obtuvo un factor de multiplicación de 0.015.

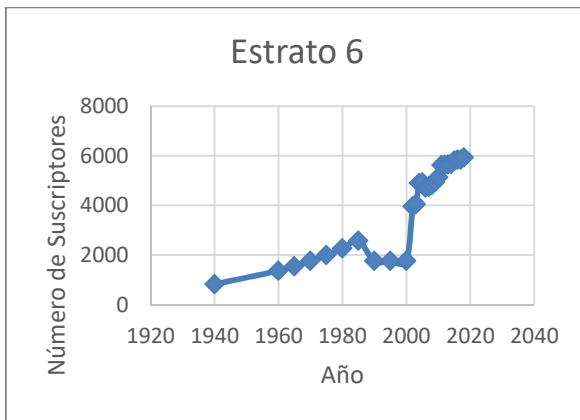


Gráfica 48 Número total de Suscriptores

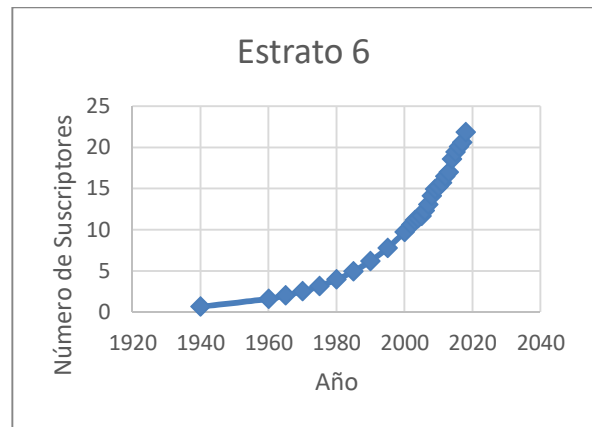


Gráfica 49 Número de Suscriptores

Finalmente, para el barrio Palo grande, donde el estrato socioeconómico es el estrato 6 (670), se obtuvo un factor de conversión de 0.0020.



Gráfica 50 Número total de Suscriptores



Gráfica 51 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del sector Derivación. Cond. El Cable-Fu, el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2015 fue de 14.84 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 41.

Año	$Caudal\ total_{ayer}^*$	Factor de Multiplicación
1940	0.6731	4.910
1960	7.136	0.691
1978	11.49	0.64061552
1998	11.72	0.93258062
2005	14.29	0.82892713

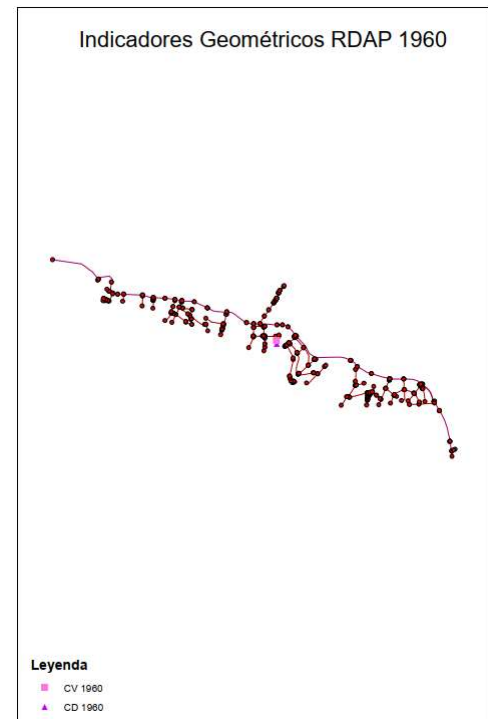
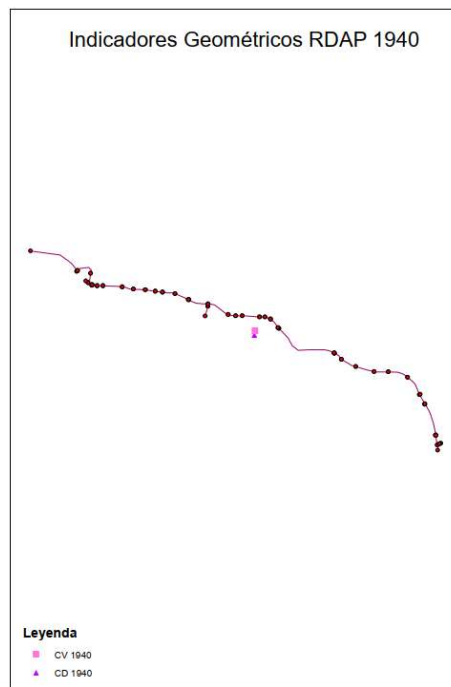
Tabla 41 Factor de Multiplicación

- Indicadores Geométricos

Los centroides del sector Derivación Cond. El Cable-Fu fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 25 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y
1940	1175270.96	1051853.84	1175267.39	1051829.73
1960	1175295.39	1051843.3	1175296.91	1051817.78
1978	1175269.62	1051850.05	1175263.96	1051832.75
1998	1175223.32	1051871.47	1175223.77	1051854.37
2005	1175191.2	1051910.24	1175182.85	1051897.77
2015	1175196.32	1051906.6	1175200.7	1051888.52

Tabla 42 Indicadores Geométricos Derivación



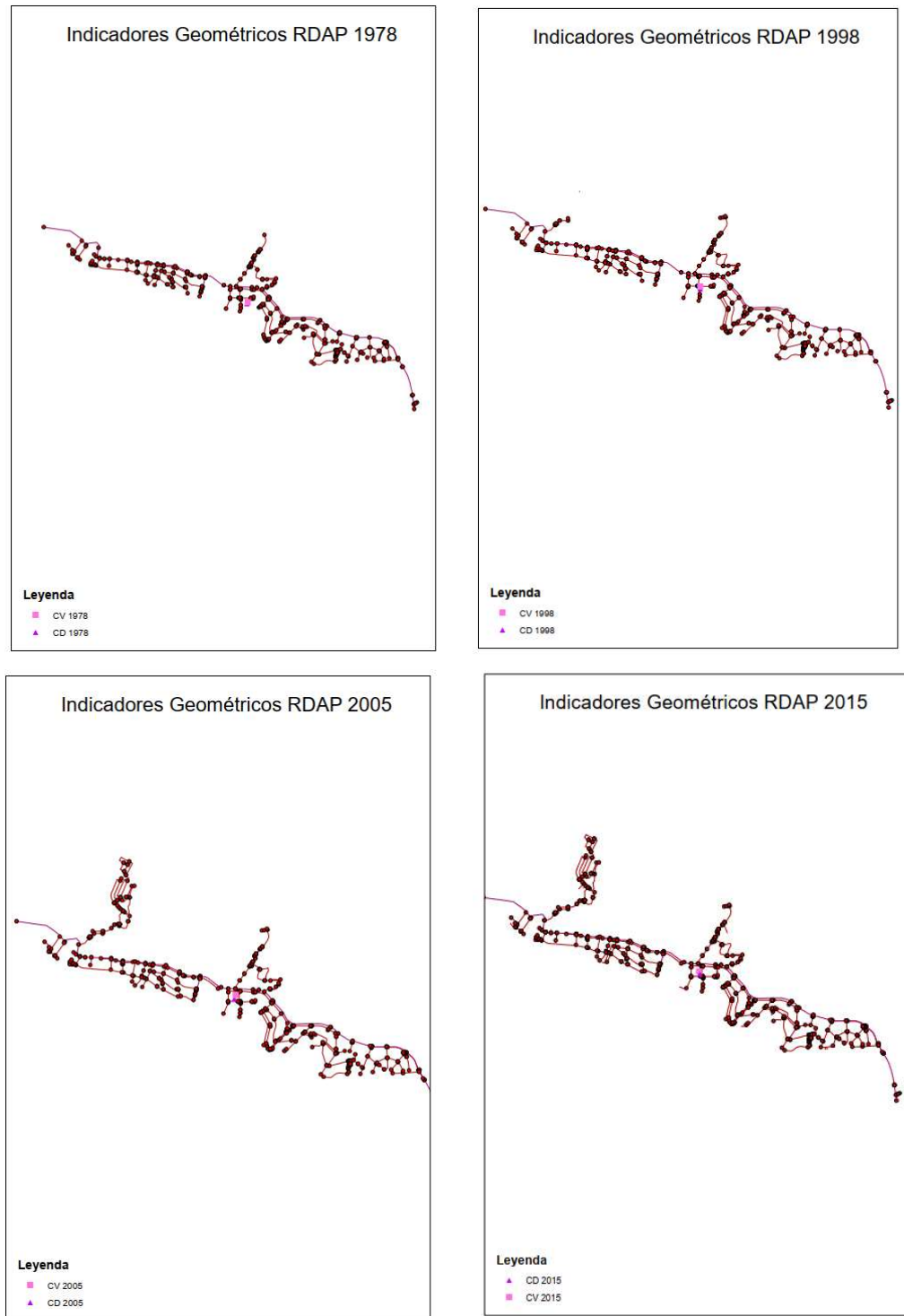


Figura 26 Ubicación de los Indicadores Geométricos Derivación

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1940	11.8
1960	6.41
1978	5.18
1998	5.12
2005	4.77
2015	4.66

Tabla 43 \bar{D}

Se puede observar en la Tabla 43 y en la Figura 26 como en 1940 la función principal de la RDAP era transmitir, y como se fue transformando en una red donde su función principal es distribuir.

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1940	1960	1978	1998	2005	2015
	E	46	261	363	381	452	490
	V	47	260	351	372	429	461
Conectividad	q	0.042553191	0.007751708	0.005809766	0.005521259	0.004912533	0.004611902
	k	1.957446809	2.007692308	2.050847458	2.048387097	2.102564103	2.121475054
	MC	0	0.003883495	0.014224751	0.0135318	0.026963658	0.031624864
Eficiencia	d	37	53	59	59	82	82
	It	13.79648474	20.54876	20.611	21.10463	24.83587	24.68775818
Centralidad	Cb	0.281033396	0.362732709	0.403233815	0.401296479	0.447795109	0.450810383
	Cc	0.077228317	0.015705194	0.029041939	0.026980207	0.039360582	0.043111241
Diversidad	h	0.318814622	0.350132034	0.360622875	0.361232664	0.352786944	0.353833112
Robustez	$\Delta\lambda$	0.008021816	0.091709582	0.03027014	0.030262921	0.229172077	0.206743659

Tabla 44 Indicadores de Teoría de Grafos

- Branch Index

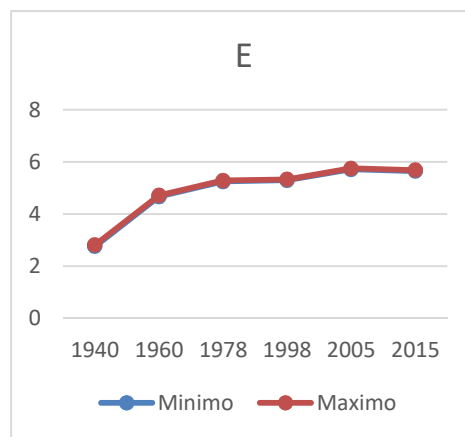
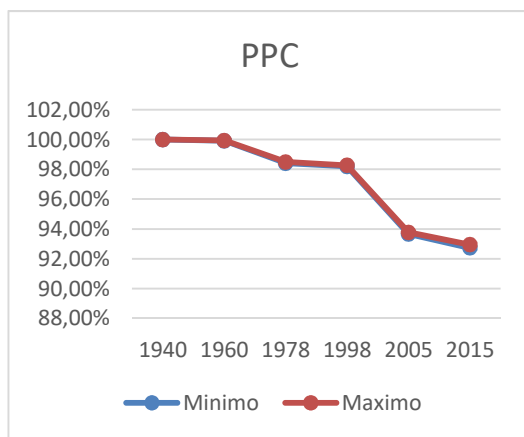
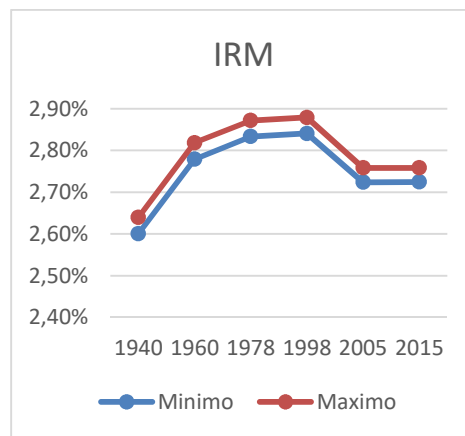
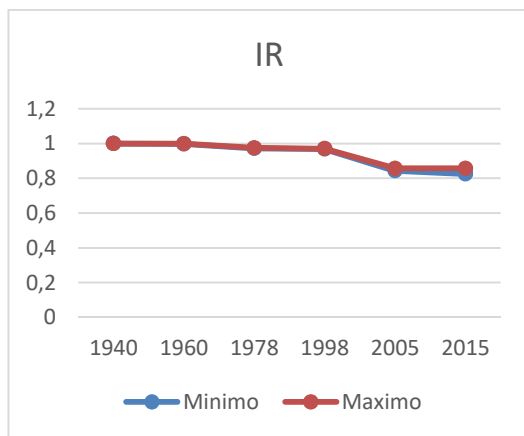
Año	BI
1940	1
1960	0.8297
1978	0.792
1998	0.7742
2005	0.653
2015	0.625

Tabla 45 Branch Index

• Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1940	1960	1978	1998	2005	2015
IR	Mínimo	0.999916	0.998388	0.972774	0.968743	0.843804	0.82493
	Máximo	0.99998	0.99875	0.97480	0.97079	0.85777	0.85774
IRM	Mínimo	2.60%	2.78%	2.83%	2.84%	2.72%	2.72%
	Máximo	2.64%	2.82%	2.87%	2.88%	2.76%	2.76%
PPC	Mínimo	100.00%	99.91%	98.41%	98.20%	93.66%	92.73%
	Máximo	100.00%	99.93%	98.49%	98.28%	93.78%	92.94%
E	Mínimo	2.76181	4.67515	5.24729	5.29702	5.71727	5.65044
	Máximo	2.81438	4.714884	5.285168	5.33033	5.75023	5.6839

Tabla 46 Indicadores de Rendimiento Hidráulico Derivación



6.1.3.4 El Cable Salida de 8:

El sector hidráulico El Cable Salida 8, está ubicado en la Comuna Palo grande, y suministra el servicio de agua potable los barrios: Guayacones, Palermo y San Canción, los cuales cuentan con el estrato 6, como la clasificación socioeconómica predominante.

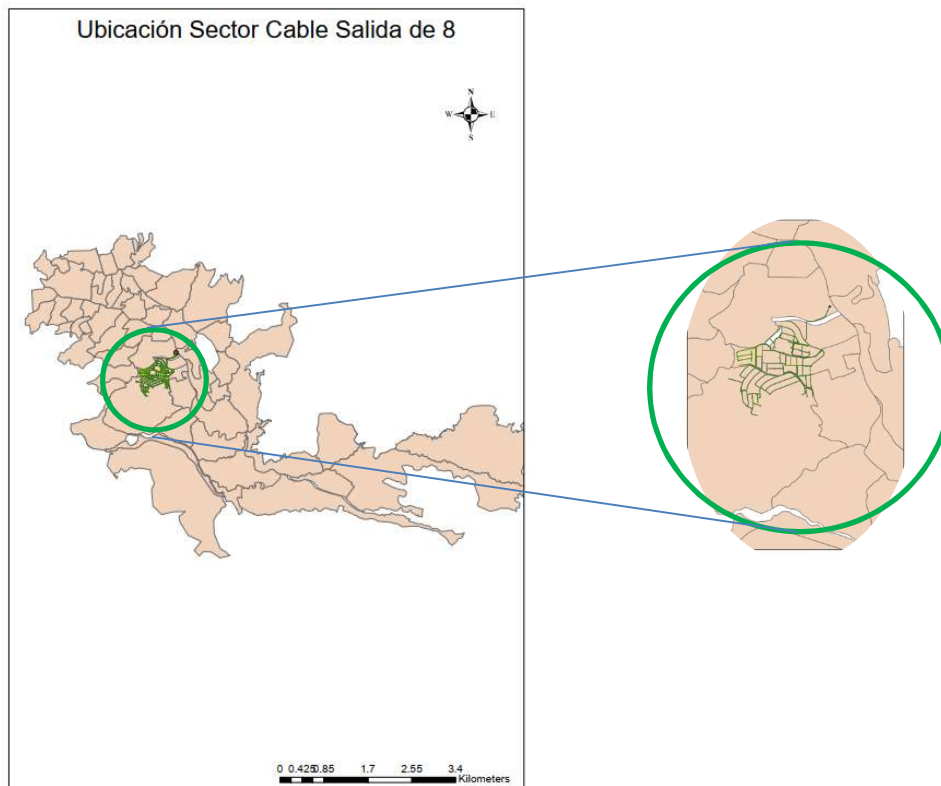
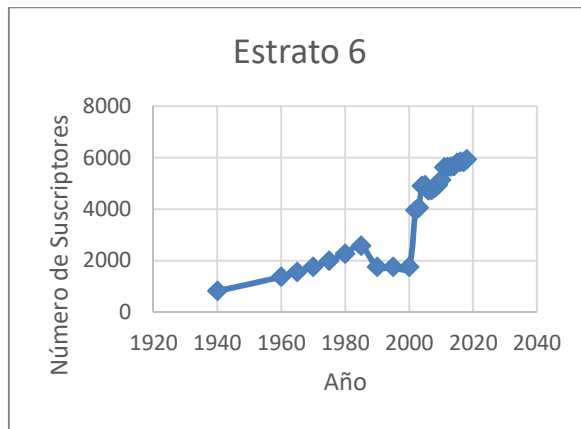
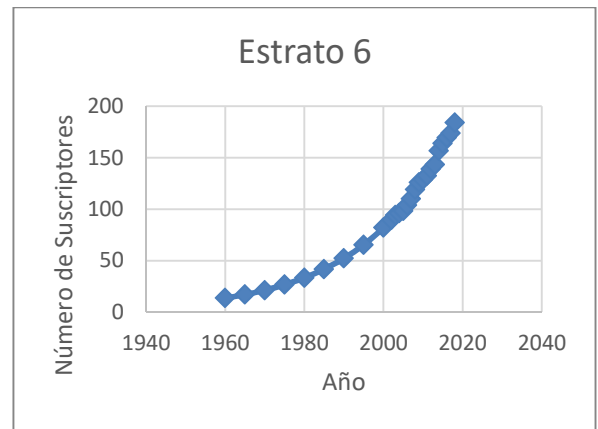


Figura 27 Ubicación Cable Salida de 8

- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población en Manizales en el censo de 1993, (327663) (DANE, 1993) y la población que habitaba en los barrios mencionados en el numeral anterior (5653), en el mismo año, obteniendo un factor de multiplicación de 0.0172.


Gráfica 56 Número total de Suscriptores

Gráfica 57 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del sector El Cable Salida de 8, el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2015 fue de 6.4113 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la tabla x:

Año	<i>Caudal total</i> _{ayer} *	Factor de Multiplicación
1979	5.347	0.244
1989	5.55	0.368

Tabla 47 Factor de Multiplicación

- Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y
1979	1176162.98	1050708.39	1176111.03	1050661.04
1989	1176160.64	1050705.21	1176111.26	1050657.21
2015	1176132.24	1050698.8	1176096.91	1050662.44

Tabla 48 Indicadores Geométricos El Cable Salida de 8

Los centroides del sector El Cable Salida 8, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 28 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.

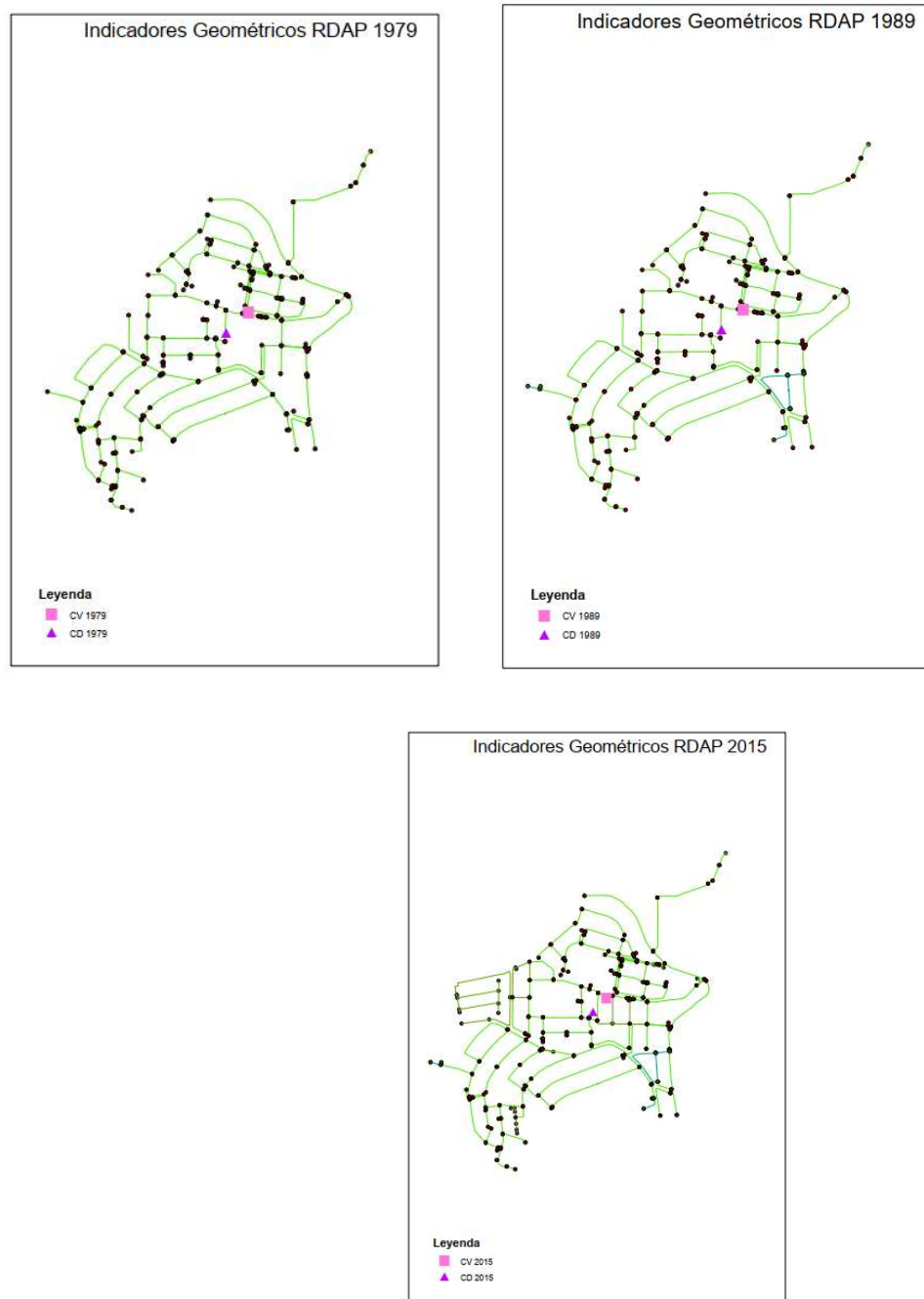


Figura 28 Ubicación Indicadores Geométricos El Cable Salida de 8

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1979	3.38
1989	3.36
2015	3.27

Tabla 49 \bar{D}

La red en totalmente de distribución.

- Teoría de Grafos

Indicador/Año		1979	1989	2015
Conectividad	E	188	194	237
	V	180	184	213
	q	0.011607697	0.011404134	0.010408362
	k	2.077777778	2.086956522	2.20657277
	MC	0.022535211	0.024793388	0.054631829
Eficiencia	d	34	34	32
	It	13.93485	14.05687	14.51235716
Centralidad	Cb	0.239811071	0.247162017	0.435725807
	Cc	0.012826998	0.01281435	0.071673752
Diversidad	h	0.402045239	0.40169481	0.392365234
Robustez	$\Delta\lambda$	0.152612744	0.152612744	0.088336563

Tabla 50 Indicadores de Teoría de Grafos El Cable Salida de 8

- Branch Index

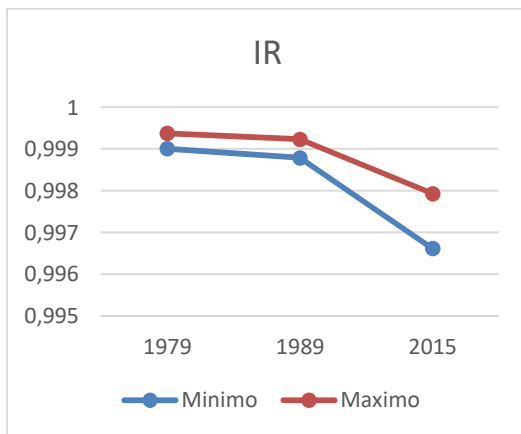
Año	BI
1979	0.5759
1989	0.5466
2015	0.4286

Tabla 51 Branch Index

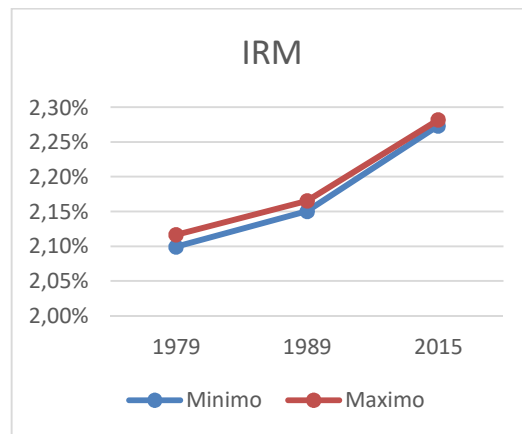
• Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1979	1989	2015
IR	Mínimo	0.99900633	0.99878573	0.99661279
	Máximo	0.99937218	0.99923187	0.99792928
IRM	Mínimo	2.10%	2.15%	2.27%
	Máximo	2.12%	2.17%	2.28%
PPC	Mínimo	99.95%	99.94%	99.84%
	Máximo	99.95%	99.94%	99.84%
E	Mínimo	4.19079208	4.33570433	5.2410202
	Máximo	4.2507472	4.40742302	5.27370787

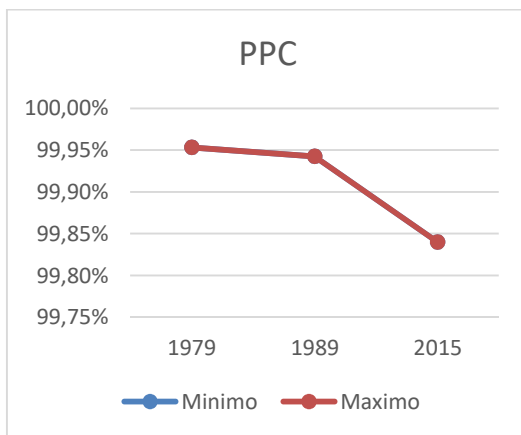
Tabla 52 Indicadores de Rendimiento Hidráulico El Cable Salida de 8



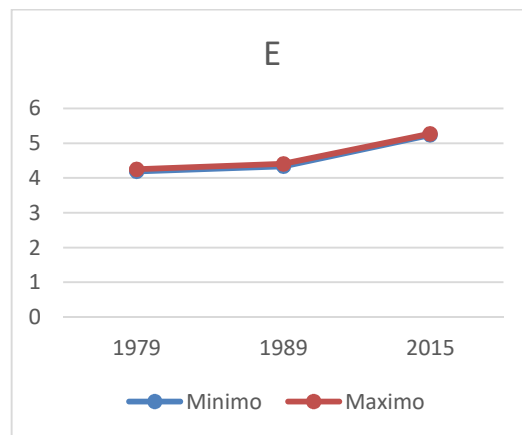
Gráfica 58 Índice de Resiliencia



Gráfica 59 Índice de Resiliencia Modificado



Gráfica 60 Índice de Potencia Específica



Gráfica 61 Entropía

6.1.3.5 T9-Belen:

El sector hidráulico T9-Belen, está ubicado en las Comunas Palo grande y Estación. Suministra el servicio de agua potable a los barrios Los Cedros, San Jorge, El Sol, La Asunción, La Leonora y La Argentina.

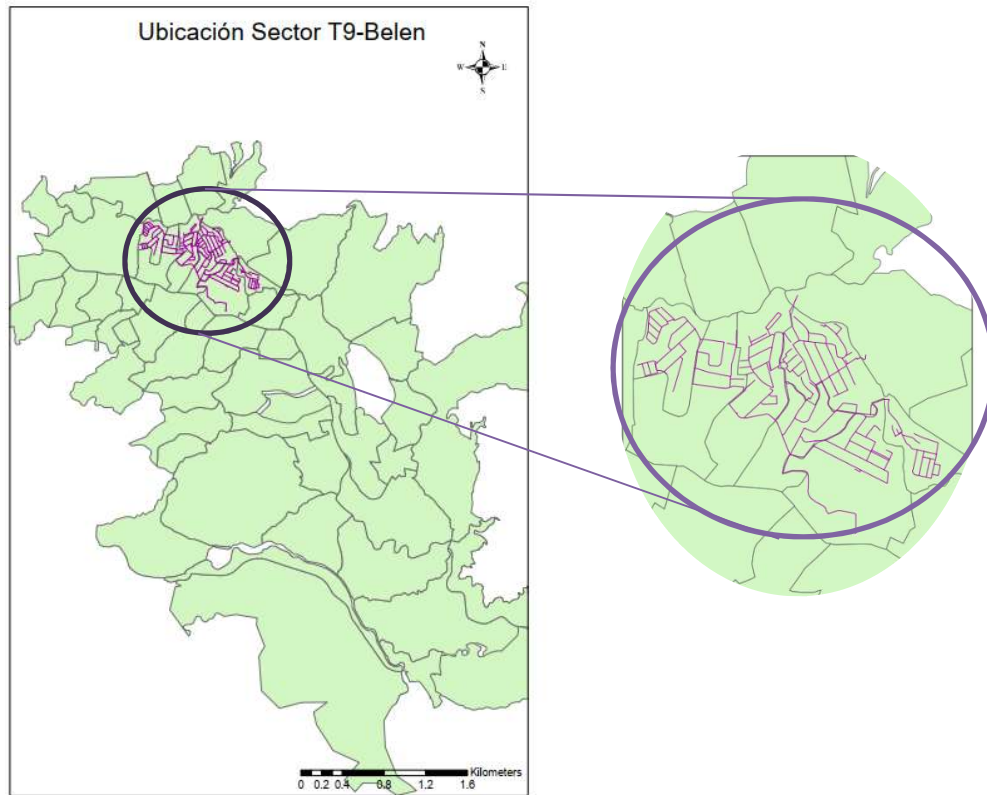


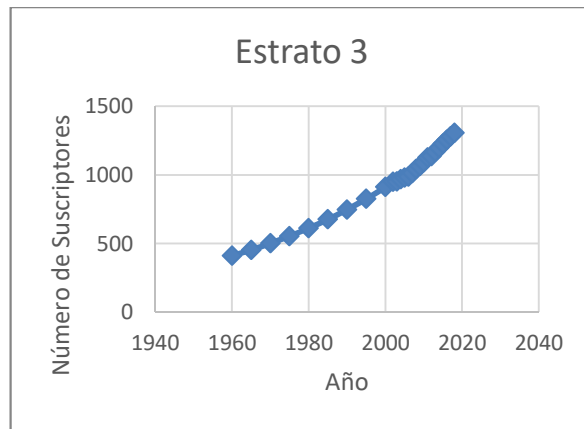
Figura 29 Ubicación Sector T9-Belen

- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre la cantidad de población en Manzanas en el censo de 1993, (327663) (DANE, 1993) y la población que habitaba en los barrios Los Cedros (1004), San Jorge (4114), El Sol (1018), La Asunción (2580) y La Argentina (2514), en el mismo año, obteniendo un factor de multiplicación para el estrato 3 de 0.0342.

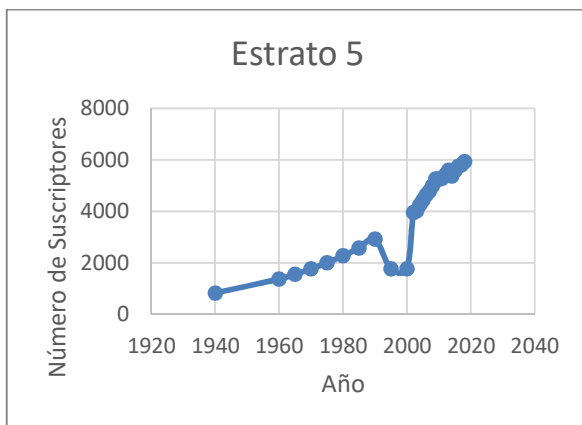


Gráfica 62 Número total de Suscriptores

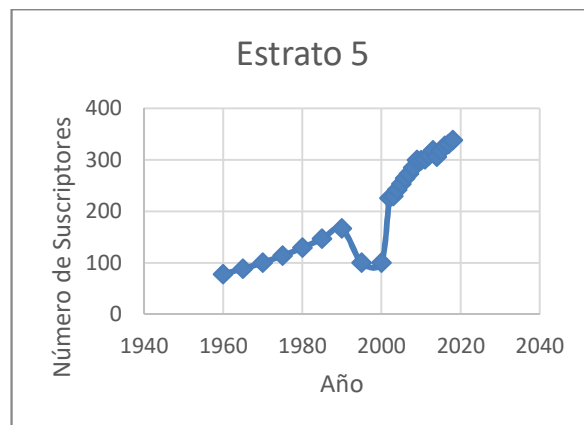


Gráfica 63 Número de Suscriptores

Mientras que para el barrio La Leonora (18663), se obtuvo un factor de multiplicación de 0.056.



Gráfica 64 Número total de Suscriptores



Gráfica 65 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del sector T9-Belen, el método que más se ajustó a los datos, fue el Exponencial.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2015 fue de 6.4113 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la Tabla 53.

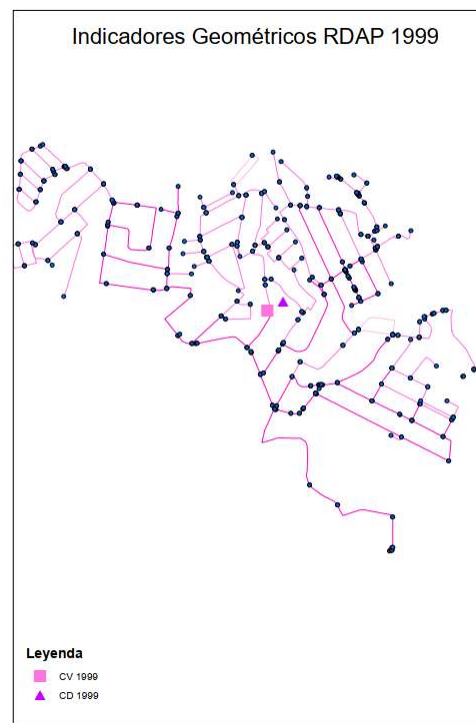
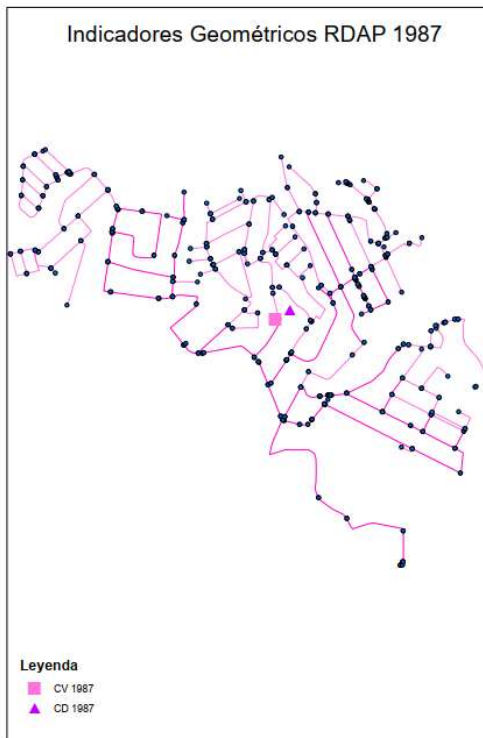
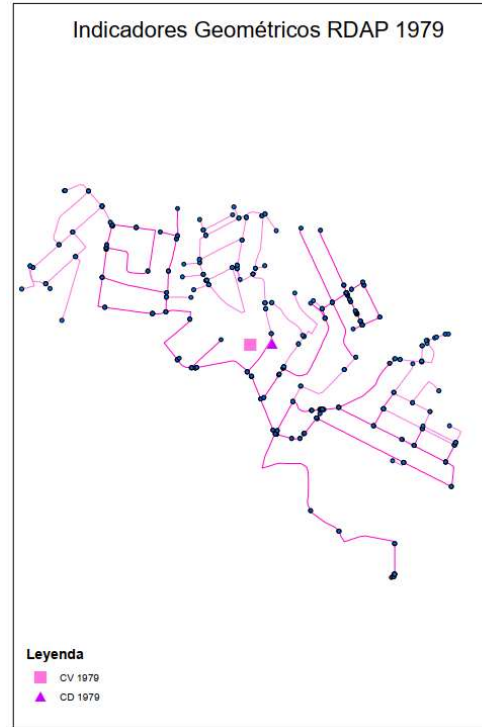
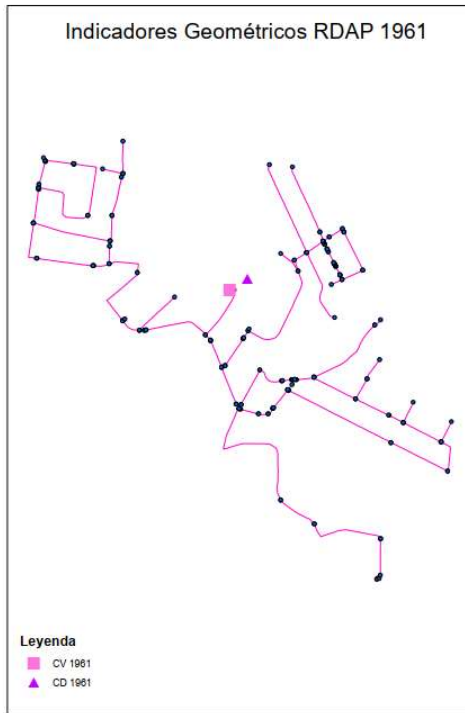
Año	<i>Caudal total</i> _{ayer} *	Factor de Multiplicación
1961	4.66	0.995
1979	8.33	0.846
1987	10.78	0.80575
1999	10.84	0.88832

Tabla 53 Factor de Multiplicación

- Indicadores Geométricos

Los centroides del sector T9-Belen, fueron calculados con la Ecuación 1 hasta la Ecuación 5 usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 30 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.

Año	VOLUME CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y
1961	1175362.98	1052220.72	1175418.2	1052218.35
1979	1175353.99	1052259.1	1175399.51	1052261.49
1987	1175390.3	1052279.68	1175420.76	1052298.61
1999	1175390.29	1052280.3	1175423.34	1052299.3
2014	1175390.06	1052280.42	1175420.96	1052301.02



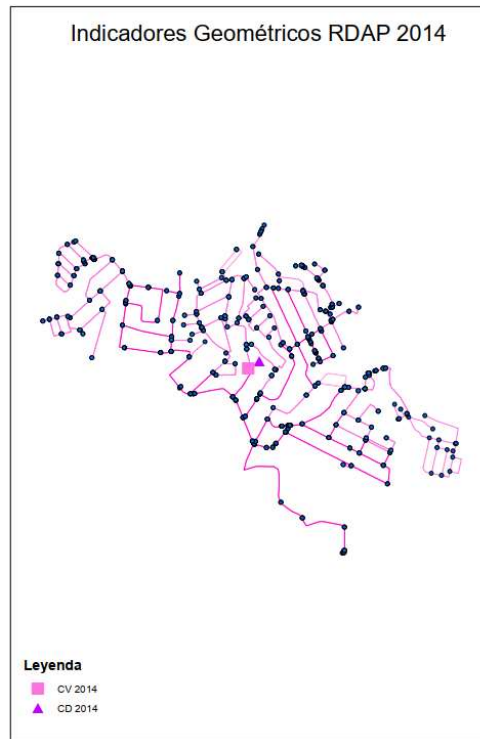


Figura 30 Ubicación de los Indicadores Geométricos T9 Belén

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	\bar{D}
1961	4.345
1979	3.745
1987	3.43
1999	3.42
2014	3.35

Tabla 54 (\bar{D})

La función principal de la RDAP es distribuir.

- Teoría de Grafos

Indicador/Año	1961	1979	1987	1999	2014	
E	118	200	286	290	323	
V	114	186	260	261	291	
Conectividad	q	0.01832013	0.01162452	0.00846450	0.00845859	0.00756013
	k	2.07017543	2.15053763	2.19230769	2.19923371	2.19243986

	Indicador/Año	1961	1979	1987	1999	2014
	MC	0.02242152	0.04087193	0.05048543	0.05222437	0.05025996
Eficiencia	d	36	49	55	54	61
	It	15.3679552	17.7589072	20.3113157	19.0420277	21.0335584
Centralidad	Cb	0.54686573	0.41609927	0.39631396	0.37406123	0.38301250
	Cc	0.06849174	0.05929095	0.05200564	0.05537751	0.05058867
Diversidad	h	0.33834498	0.35493807	0.34525744	0.34264447	0.34218776
Robustez	$\Delta\lambda$	0.12961552	0.03916198	0.05215208	0.05191780	0.05117558

Tabla 55 Indicadores de Teoría de Grafos T9-Belen

- Branch Index

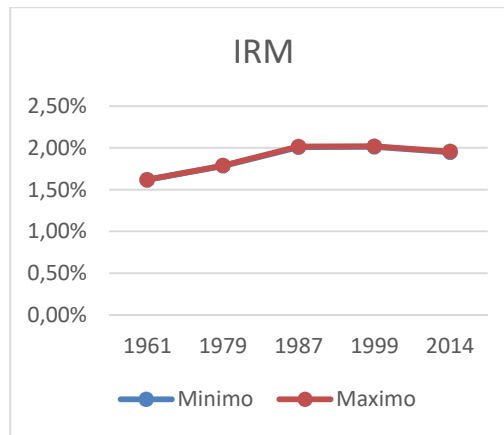
Año	BI
1961	0.5238
1979	0.4745
1987	0.4762
1999	0.4481
2014	0.4267

Tabla 56 Branch Index

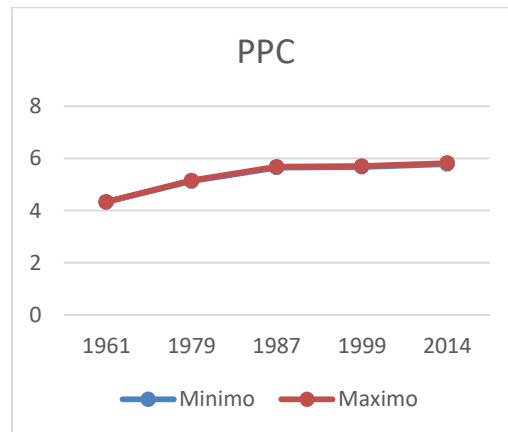
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año		1961	1979	1987	1999	2014
IRM	Mínimo	1.62%	1.78%	2.01%	2.01%	1.95%
	Máximo	1.62%	1.79%	2.02%	2.02%	1.96%
PPC	Mínimo	99.94%	99.91%	99.86%	99.86%	98.05%
	Máximo	99.97%	99.95%	99.92%	99.93%	98.14%
E	Mínimo	4.32769871	5.1256814	5.64595079	5.669734	5.78121376
	Máximo	4.33181	5.15252209	5.68110514	5.70328236	5.8174839

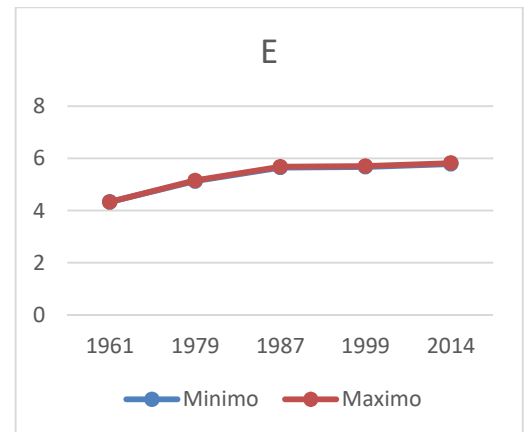
Tabla 57 Indicadores de Rendimiento Hidráulico



Gráfica 66 Índice de Resiliencia



Gráfica 67 Índice de Potencia Específica



Gráfica 68 Entropía

6.1.4 Cartagena

6.1.4.1 Las Lomas

El Sector de Las Lomas en Cartagena, está ubicado aproximadamente en el barrio Las Lomas y Monserrate el cual es catalogado en la clasificación de estratificación socioeconómica como un barrio estrato 1. Esto se puede observar en la Figura 31.

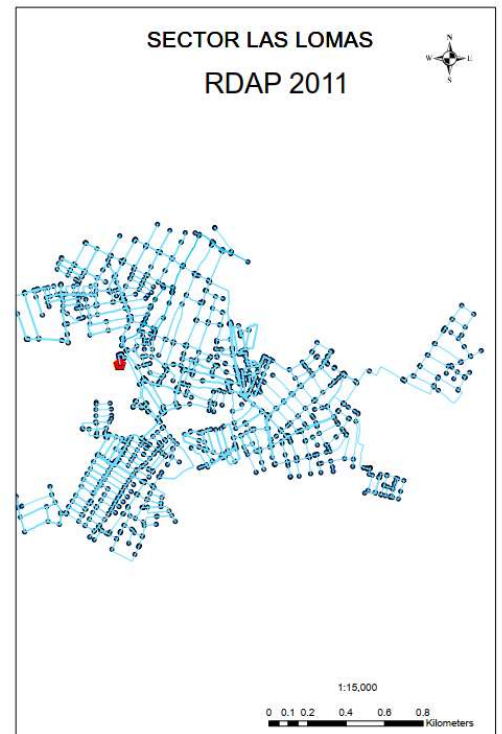
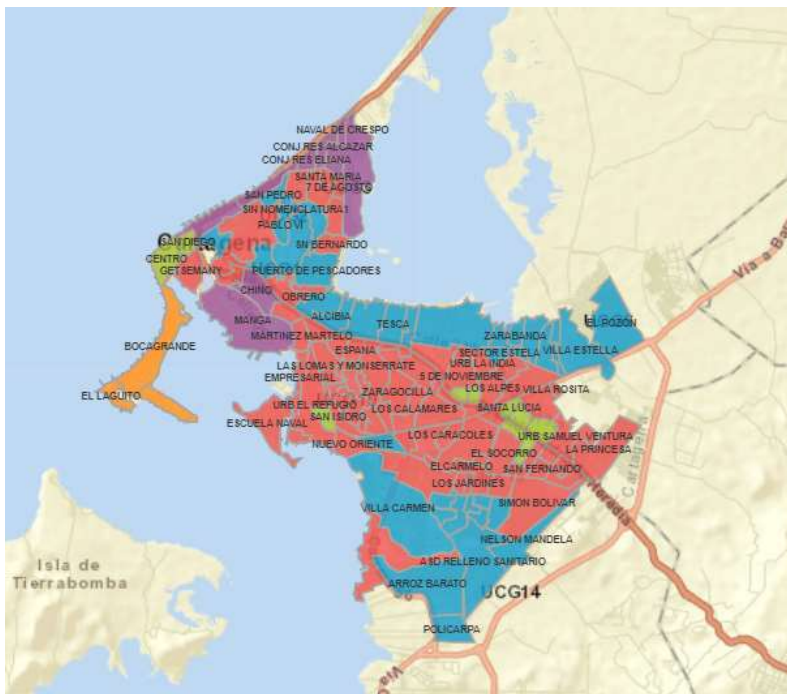


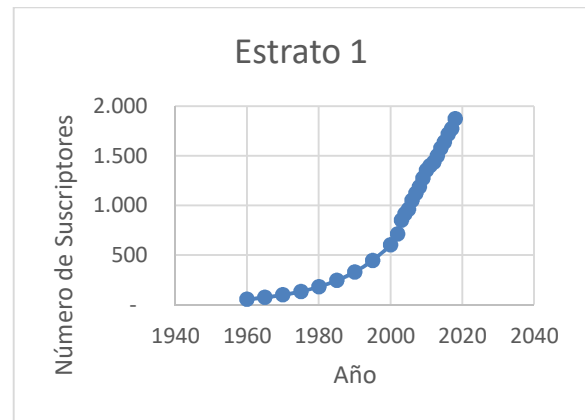
Figura 31 Ubicación del Sector Lomas

- Proyección de Población

Con el fin de obtener una aproximación del número de suscriptores que hacen parte de la zona, se calculó una relación entre el área total de ciudad, y el área total del polígono que rodea el sector Las Lomas, obteniendo un factor de multiplicación para el estrato 1 de 0.02.



Gráfica 69 Numero tota de Suscriptores



Gráfica 70 Número de Suscriptores

Para el caso de la proyección de suscriptores del sector T9-Belen, el método que más se ajustó a los datos, fue el Geométrico.

- Estimación de demandas base

A partir de la Ecuación 27 fue posible aproximar las demandas en cada uno de los nodos de la red para los diferentes años en los que se pretende analizar el sector. El caudal total demandado en el año 2015 fue de 409.98 l/s. Los factores de multiplicación y los demás componentes de la Ecuación 27 se pueden observar en la tabla x:

Año	$Caudal\ total_{ayer}^*$	Factor de Multiplicación
1969	35.83	3.262
1973	49.48	2.788
1978	13.92	1.257
1991	8.78	1.496

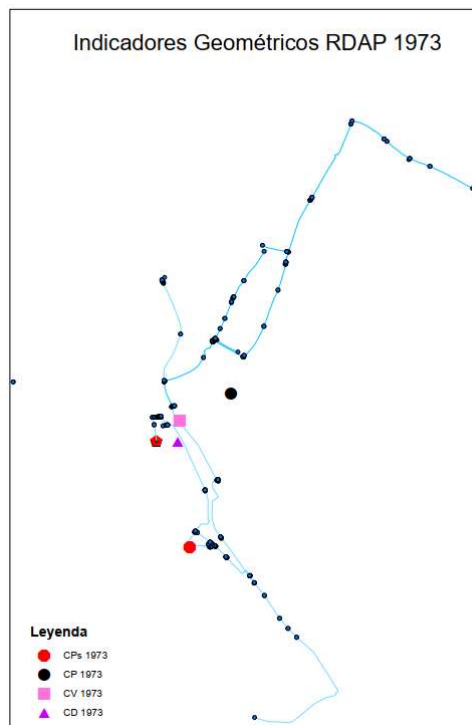
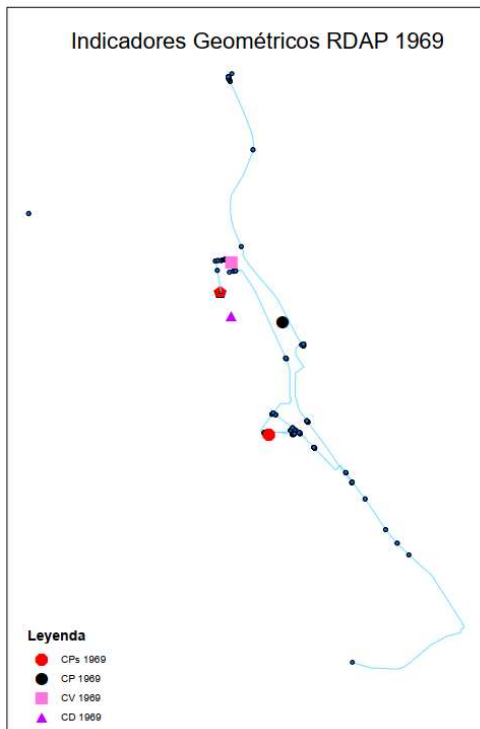
Tabla 58 Factores de Multiplicación

• Indicadores Geométricos

Año	VOLUME CENTROID (m)		SPECIFIC POWER CENTROID (m)		DIAMETER CENTROID (m)		POWER CENTROID (m)	
	C _x	C _y	C _x	C _y	C _x	C _y	C _x	C _y
1969	842973.083	1642116.11	843031.988	1641845.45	842972.23	1642031.06	843053.124	1642022.69
1973	843004.713	1642111.06	843026.173	1641895.3	843000.928	1642067.57	843112.687	1642168.63
1978	843054.536	1642064.27	843052.835	1641856.86	843021.783	1642031.51	843439.967	1642399.31
1991	843203.34	1642044.42	843102.355	1641897.31	843258.15	1641998.23	843157.272	1642050.64
2000	843230.591	1642034.37	(-)	(-)	843275.873	1641971.6	(-)	(-)
2011	843256.976	1641988.68	843128.922	1641870.21	843313.71	1641949.03	843336.17	1641971.61

Tabla 59 Indicadores Geométricos Las Lomas

Los centroides del sector Las Lomas, fueron calculados con Ecuación 1 hasta la Ecuación 5, usando las coordenadas de cada uno de los nodos de la red. En la Figura 32 se puede observar que la variación de todos los indicadores geométricos es mínima.



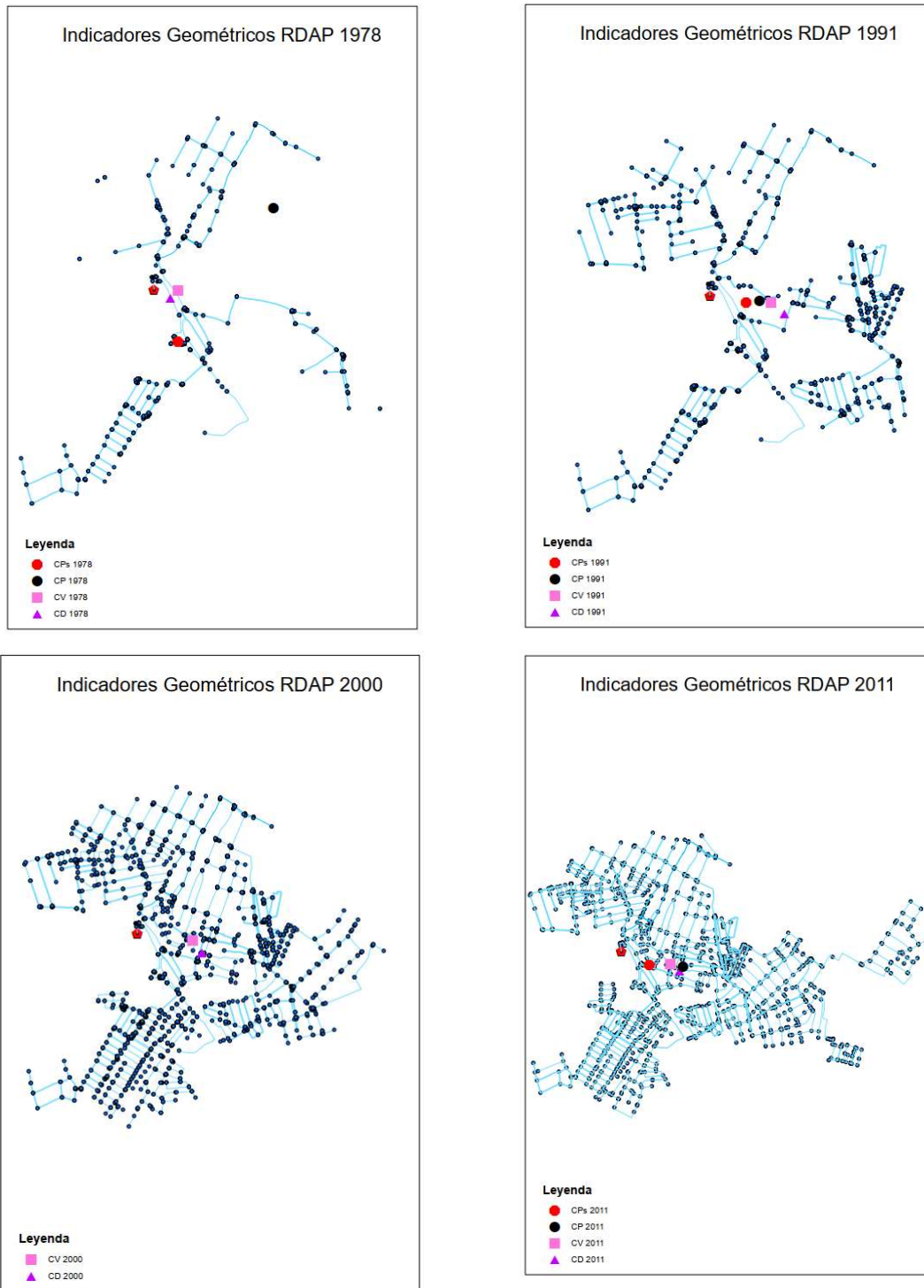


Figura 32 Ubicación de los Indicadores Geométricos Las Lomas

- Length-weighted average pipe diameter (\bar{D})

Año	(\bar{D})
1969	14.2
1973	9.9
1978	6.8
1991	5.8
2011	4.4

Tabla 60 \bar{D}

- Teoría de Grafos

	Indicador/Año	1969	1973	1978	1991	2011
	E	97	169	430	804	1986
	V	95	167	416	778	1808
Conectividad	q	0.021724	0.01219	0.0049	0.00266	0.00121
	k	2.0421	2.02	2.06	2.066	2.19
	MC	0.01621	0.009118	0.01813	0.0174	0.0495
Eficiencia	d	71	109	125	125	115
	lt	23.05	36.64	46.07	49.78	44.86
Centralidad	Cb	0.308	0.352	0.481	0.5776	0.5255
	Cc	0.0461	0.02871	0.023	0.017	0.0233
Diversidad	h	0.213	0.209	0.258	0.287	0.306
Robustez	$\Delta\lambda$	0.347	0.347	0.2123	0.2123	0.0068

Tabla 61 Indicadores de Teoría de Grafos Las Lomas

- Branch Index

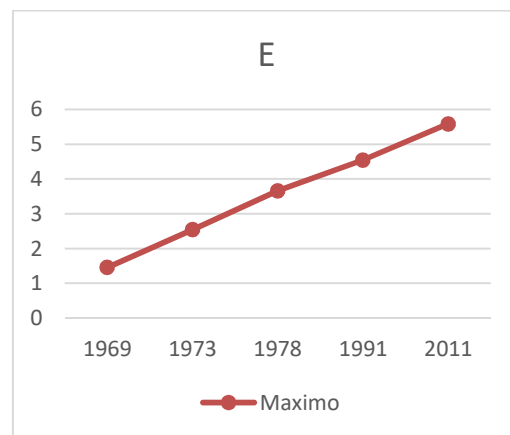
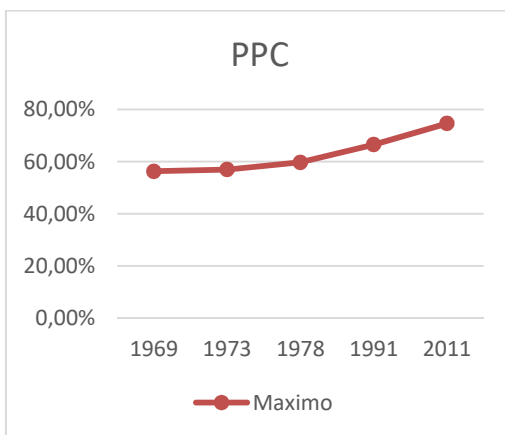
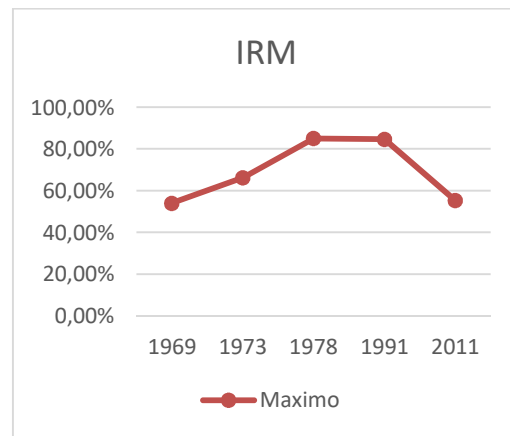
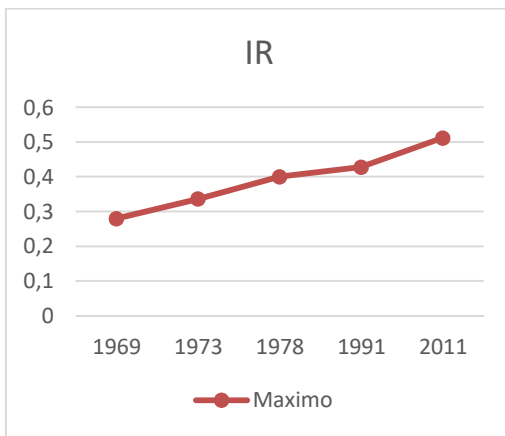
Año	BI
1969	0.8902
1973	0.9416
1978	0.8241
1991	0.7487
2011	0.3908

Tabla 62 Branch Index

• Indicadores de Rendimiento Hidráulico

Indicadores Hidráulicos/Año	1969	1973	1978	1991	2011
IR	0.27954045	0.33600107	0.40014061	0.42791069	0.51139855
IRM	53.96%	66.17%	85.01%	84.61%	55.28%
PPC	56.30%	56.97%	59.73%	66.51%	74.62%
E	1.45540071	2.54410648	3.660604	4.54620314	5.5831666

Tabla 63 Indicadores e Rendimiento Hidráulico Las Lomas



6.2 Análisis de Resultados

6.2.1 Bogotá

6.2.1.1 Sector 18

El mayor desarrollo del Sector 18 se presenta en el periodo de tiempo que va desde 1975 a 1986, con un aumento de las tuberías que componen la red en un 23.30 %. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo varía de 14 a 12 in.

- **Indicadores Geométricos:** Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (Cd y Cv) era mínimo. Es decir, de máximo 300 metros. Esta variación máxima se da en el intervalo de tiempo entre 1975 y 1986, que es el periodo de tiempo donde se presenta el mayor porcentaje de desarrollo. En el resto de los años analizados, la variación en las coordenadas de los indicadores (Cd y Cv) son muchos menores, a pesar de que la topología de la red cambia, los indicadores son prácticamente un promedio ponderado de las coordenadas con respecto a las características del sistema (Diámetro, Volumen, Diferencia de presiones, etc), es por esto por lo que el centroide tiende a ubicarse donde el valor máximo de estas características predomina. Otra razón importante es que el desarrollo entre los periodos de tiempo adicionales al que se comprende entre 1975 y 1986 son menores al 10%, esto quiere decir que el aumento en las características topológicas a lo largo del tiempo no es realmente significativo.

Por otra parte, los indicadores geométricos (Cp y Cps) tampoco varían en gran porcentaje en el tiempo, pero si varían respecto a los indicadores Cd y Cv. Esto se debe a que los indicadores Cp y Cps están en función de las características hidráulicas del sistema. Ubicándose por ejemplo en el caso de Cp, que está en función de la demanda de cada nodo, en el punto donde las demandas en los nodos son mayores. Otra razón por la que estos indicadores no cambian en el tiempo se debe a que, a pesar de que el valor de la demanda fue modificado dependiendo del número suscriptores que se estima existían en los diferentes años en la zona, la demanda sigue distribuida en la red en la misma proporción.

- **Teoría de grafos**

- ✓ **Conectividad:** Esta característica topológica se evaluó a través de 3 indicadores: “Link density”, “Average node degree” y el coeficiente maya, los dos primeros no tienen una escala establecida en la literatura, ya que esta depende principalmente de la magnitud de cada una de las redes estudiadas (Yazdani et al., 2011), se puede afirmar que los valores obtenidos para la RDAP del Sector 18 tienen magnitudes parecidas a las expuestas en la literatura. El “Link Density” varía de 0.00699 en el año 1969 a 0.00308 en el año 2013, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la

esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 8 que tiene tendencia a aumentar, esto indica que a medida que pasa el tiempo se va generando una mayor cantidad de circuitos, aumento la redundancia de la red, este valor varía desde 0.00866 a 0.0447.

- ✓ Eficiencia: Los indicadores usados para evaluar la eficiencia de la red, tampoco cuentan con una escala establecida, estos indicadores cambian su magnitud dependiendo del tamaño de la red. El diámetro o “the longest shortest path” simplemente muestra la extensión de la red desde el punto de vista geodésico, es decir establece por cuantos nodos hay que pasar para recorrer la distancia más corta de la red desde cualquier pareja de nodos. En este caso el valor del diámetro de la red disminuye, pasando de 146 a 111.
 - ✓ Centralidad: Los indicadores de centralidad indican, principalmente la importancia de los nodos en el momento de pasar la mayor información por la red, es decir muestran que tan vulnerable es la red ante cualquier evento de falla que se presente alrededor del nodo más central. Los indicadores C_B y C_i^C deben estar asociados a valores entre 0 y 1, si estos indicadores tienen valores cercanos a 1, muestran que la red es menos vulnerable a las fallas en el nodo considerado como el más central. En este caso el C_B y C_i^C varía entre (0.357- 0.512) y (0.0204 y 0.0245) respectivamente. Se observa que el valor de C_B indica que a medida que se va desarrollando la red, esta se vuelve menos vulnerable. Con respecto al C_i^C los valores no varían significativamente con el paso del tiempo, pero si son muy cercanos a cero, lo que muestra que la eficiencia de difusión en la red no es buena.
 - ✓ Diversidad: El valor de h se mantiene constante en el tiempo (0.25).
 - ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap no muestra una tendencia definida, ya que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta entre los años 1994 y 2005 con valores de 0.11 en los dos años, es decir que en estos años la resistencia del sistema a fallas aleatorias es mucho mejor que en los demás.
- Branch Índice: Como se mencionó anteriormente, es evidente que en la Tabla 9 que el sistema pasa de ser una red ramificada a una red compuesta por circuitos (0.827 a 0.402).
 - Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico fue de 15 metros. El valor del indicador IR esta es muy cercano a 1, varía entre 0.90 y 0.98. Lo que indica que la LGH de todos los nodos está muy cerca al embalse o tanque

que alimenta de la red. El valor del indicador IRM varía entre 7.39% y 0.65%, esto indica que a lo largo que para el tiempo la LGH de los nodos se acerca más a la LGH mínima. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 99.9% a 97.3%, lo que indica que se está usando casi toda la energía disponible para suplir la demanda del sistema.

Con respecto a la Entropía se puede afirmar que es casi constante en el tiempo, lo que quiere decir que es que, durante todos los años estudiados, todos los nodos cuentan con muchos caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente.

6.2.1.2 Sector 25

El mayor desarrollo del Sector 25 se presenta en el periodo de tiempo que va desde 1975 a 1980, con un aumento de las tuberías que componen la red en un 26.70 %. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo es 5 in.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v, C_p y C_{ps}) era mínimo. Es decir, de máximo 300 metros. Esta variación máxima se da en el intervalo de tiempo entre 1990 al 2009. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el Sector 18.

- Teoría de grafos

- ✓

- ✓

- ✓ Conectividad: se puede afirmar que los valores obtenidos para la RDAP del Sector 25 tiene magnitudes parecidas a las expuestas en la literatura. El “Link Density” varía de 0.014 en el año 1969 a 0.0034 en el año 2015, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 14 que tiene tendencia a aumentar, esto indica que a medida que pasa el tiempo se va generando una mayor cantidad de circuitos, aumento la redundancia de la red, este valor varía desde 0.00749 a 0.025.

- ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasando de 62 a 86.

- ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C varían entre (0.43- 0.51) y (0.050 y 0.029) respectivamente. Se observa que el valor de C_B lo que indica que a medida que se va desarrollando la red, esta se vuelve menos vulnerable. Con respecto al C_i^C los valores

disminuyen con el paso del tiempo, y son muy cercanos a cero, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red no es buena.

- ✓ **Diversidad:** El valor de h se mantiene constante en el tiempo (0.29).
- ✓ **Robustez:** En este caso el Spectral Gap no muestra una tendencia definida, ya que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en el año 1975 con un valor de 0.115, esto coincide con el intervalo de tiempo en que más se desarrolló la red. Por otra parte, se puede decir que en este año la resistencia del sistema a fallas aleatorias es mucho mejor que en los demás.
- **Branch Índice:** Como se mencionó anteriormente, en la Tabla 15 se puede observar que el sistema se caracteriza por ser una red ramificada a lo largo del tiempo.
- **Indicadores de Rendimiento Hidráulico:** La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 20 metros. El valor del indicador IR está más cercano a 0 que a 1, varía entre 0.33 y 0.45. El valor del indicador IRM varía entre 0.45% y 0.80%, esto indica que a lo largo que pasa el tiempo la LGH de los nodos se acerca más a la LGH mínima. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 74.85% a 76.11%, lo que indica que se está consumiendo un gran porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema.

Con respecto a la Entropía esta varía entre (4.6 y 6.5) lo que quiere decir que es que, a largo que pasa el tiempo, los nodos cuentan con más caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente.

6.2.2 Cali

6.2.2.1 RBS. 19

El mayor desarrollo del RBS-19 se presenta en el periodo de tiempo que va desde 1978 a 1985, con un aumento de las tuberías que componen la red en un 12%. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo es 7 in.

- **Indicadores Geométricos:** Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v, C_p y C_{ps}) era mínimo. Es decir, de máximo 150 metros. Esta variación máxima se da en el intervalo de tiempo entre 1989 al 1995. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el Sector 25.

- Teoría de grafos
 - ✓ Conectividad: El “Link Density” varía de 0.028 en el año 1965 a 0.0027 en el año 2014, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 20 que tiene tendencia a aumentar, esto indica que a medida que pasa el tiempo se va generando una mayor cantidad de circuitos, aumentando la redundancia de la red, este valor varía desde 0.0104 a 0.089.
 - ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, llega a su máximo en el año 1975 con un valor de 99 y disminuye hasta 51 en el 2014.
 - ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C no presentan una tendencia clara, puesto que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Su valor se mantiene entre 0.247 y 0.36. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.0281 y 0.048, son muy cercanos a cero, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red no es buena.
 - ✓ Diversidad: El valor de h se mantiene constante en el tiempo (0.3).
 - ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap no muestra una tendencia definida, ya que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en el año 1965 con un valor de 0.19, este año es uno de los años en que la red se desarrolló en un mayor porcentaje. Por otra parte, se puede decir que en este año la resistencia del sistema a fallas aleatorias es mucho mejor que en los demás.
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 10 metros. El valor del indicador IR está más cercano a 1, varía entre 0.97 y 0.85. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 81.28% a 98.64%, lo que indica que se está consumiendo un gran porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema.

Con respecto a la Entropía esta varía entre (2.38 y 5.03) lo que quiere decir que es que, a largo que pasa el tiempo, los nodos cuentan con más caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente.

6.2.2.2 RBS. 22

El mayor desarrollo del RBS-22 se presenta en 1975, ya que este año se desarrolló el 38.2% de la red. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo es de 4 in.

• **Indicadores Geométricos:** Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v, C_p y C_{ps}) era mínimo. Es decir, de máximo 50 metros. Esta variación máxima se da en el intervalo de tiempo entre 1978 al 1998. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el RBS-19.

• **Teoría de grafos**

✓ **Conectividad:** El “Link Density” varía de 0.00478 en el año 1975 a 0.00187 en el año 2017, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 26 que no tiene una tendencia definida, ya que en algunas ocasiones aumenta y en otras disminuye con respecto a los años anteriores, el año que tiene una mayor redundancia es el 2017, con un valor 0.1

✓ **Eficiencia:** En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, llega a su máximo en el año 1985 con un valor de 98 y disminuye hasta 59 en el 2017.

✓ **Centralidad:** En este caso el C_B y C_i^C no presentan una tendencia clara, puesto que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Su valor se mantiene entre 0.35 y 0.46. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.032 y 0.085, son muy cercanos a cero, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red no es buena.

✓ **Diversidad:** El valor de h se mantiene constante en el tiempo (0.3).

✓ **Robustez:** En este caso el Spectral Gap no muestra una tendencia definida, ya que en algunas ocasiones aumenta con respecto al año anterior y en otras disminuye. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en los años 1975 y 1985 con un valor de 0.085, este año es uno de los años en que la red se desarrolló en un mayor porcentaje. Por otra parte, se puede decir que en este año la resistencia del sistema a fallas aleatorias es mucho mejor que en los demás.

• **Indicadores de Rendimiento Hidráulico:** La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 10 metros. El valor del indicador IR varía entre 0.62 y 0.97. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 74.99% a 98.86%, lo que indica que se está consumiendo un gran porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, este varía entre 1.79% y 4.80%.

Con respecto a la Entropía esta varía entre (4.44 y 6.66) lo que quiere decir que es que, a largo que pasa el tiempo, los nodos cuentan con más caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente

6.2.3 Manizales

6.2.3.1 Bajo Rosales

El mayor desarrollo del sector Bajo Rosales se presenta en 1977, ya que este año se desarrolló el 48.6. % de la red. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo es de 3 in.

- **Indicadores Geométricos:** Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v) era mínimo. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1990 y 2013. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el RBS-22.

- **Teoría de grafos**

- ✓ **Conectividad:** El “Link Density” varía de 0.117 en el año 1977 a 0.07 en el año 2013, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 32 que aumenta a medida que pasa el tiempo, pasando de un valor en 1977 de 0.032 a 0.084 en el 2013. , eso quiere decir que la red se va desarrollando creando un mayor número de circuitos, los cuales aumentan la redundancia de la red.

- ✓ **Eficiencia:** En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasa de 9 en 1977 a 14 en el 2013.

- ✓ **Centralidad:** En este caso el C_B y C_i^C , el C_B aumenta a lo largo del tiempo, pasando de 0.30 a 0.39. Esto indica que la red se ha vuelto cada vez menos vulnerable a la falla del nodo más central. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.28 y 0.17, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red disminuye con el tiempo.

- ✓ **Diversidad:** El valor de h pasa de 0.51 a 0.40.

- ✓ **Robustez:** En este caso el Spectral Gap muestra una tendencia a disminuir, pasando de un valor de 0.63 en 1977 a 0.16 en el 2013. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en los años 1977, este año es en el que se presentó el mayor desarrollo de la red.

- **Indicadores de Rendimiento Hidráulico:** La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 15 metros. El valor del indicador IR varía entre 0.99 y 0.73. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 99.9% a 82.46%, lo que indica que se está consumiendo un gran porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, este varía entre 2.31% y 2.48 %.

Con respecto a la Entropía esta varía entre 2.58 y 3.37 lo que quiere decir que es que, a largo que pasa el tiempo, los nodos cuentan con más caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente

6.2.3.2 Circuito 51

El mayor desarrollo del sector Circuito 51 se presenta en el año 1978, ya que este año se desarrolló el 34% de la red. El diámetro predominante en este intervalo de tiempo es de 3 in.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v) era mínimo. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1960 y 1978. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el sector Bajo Rosales.

- Teoría de grafos

- ✓ Conectividad: El “Link Density” varía de 0.0327 en el año 1960 a 0.016 en el año 2004, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 38 que aumenta a medida que pasa el tiempo, pasado de un valor en 1960 de 0.016 a 0.035 en él 2005. , eso quiere decir que la red se va desarrollando creando un mayor número de circuitos, los cuales aumentan la redundancia de la red.

- ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasa de 21 en 1960 a 34 en el 2004.

- ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C , el C_B no tiene una tendencia definida, puesto que en algunos casos aumenta y en otros disminuye con respecto al año anterior. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.05 y 0.1, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red disminuye con el tiempo.

- ✓ Diversidad: El valor de h se mantiene entre 0.30 y 0.35.

- ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap no muestra ninguna tendencia. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en los años 1978, con un valor de Spectral Gap igual 0.23. Este año es en el uno de los mayores porcentajes de desarrollo de la red, con un 34%.

- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico fue de 15 metros. El valor del indicador IR varía se mantiene constante y es

de 0.645. Con respecto al indicador PPC, tiene un valor de 78.49%, lo que indica que se está consumiendo un gran porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, tiene un valor de 2.16% aproximadamente.

Con respecto a la Entropía, esta se mantiene relativamente constante en el tiempo, con un valor de 4.63, lo que quiere decir que los nodos cuentan con el mismo número de rutas de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente

6.2.3.3 Derivación Cond. El Cable-Fu

El mayor desarrollo del sector Derivación Cond. El Cable-Fu se presenta entre los años 1960 y 1978, con un porcentaje de desarrollo del 74%, y le siguen los años 1940 y 1960 con un porcentaje de desarrollo del 53%. El diámetro predominante en este intervalo los intervalos mencionados anteriormente fueron 12 in y 5 in respectivamente.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v) era mínimo. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1978 y 1998. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en el sector Circuito 51.

- Teoría de grafos

- ✓ Conectividad: El “Link Density” varía de 0.04 en el año 1940 a 0.0046 en el año 2015, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 44 que aumenta a medida que pasa el tiempo, es muy importante resaltar que el valor del indicador MC en el año 1940 es 0, puesto que en este año la estructura de la red no cuenta con ningún circuito. A partir del año 1960 el valor de MC no presenta una tendencia marcada, puesto que su valor alguna vez aumenta y otras disminuye con respecto al año anterior, el indicador varió de 0.00388 a 0.026. La red es más redundante en el año 2005.
- ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasa de 37 en 1940 a 82 en el 2015.
- ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C , el C_B aumenta con respecto al tiempo pasando de un valor de 0.28 en el año 1940 a 0.45 en el año 2015, esto indica que la vulnerabilidad de la red a daños en el nodo más central ha bajado a medida que pasa el tiempo. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.01 y 0.07 son valores muy cercanos a cero, los cuales indican que la eficiencia de difusión de información de la red no es buena.

- ✓ Diversidad: El valor de h varía entre 0.31 y 0.36.
- ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap no muestra ninguna tendencia. Se puede afirmar que la mejor posibilidad de expansión se presenta en los años 1960, con un valor de Spectral Gap igual 0.09. Este año es uno de los mayores porcentajes de desarrollo de la red, con un 53%.
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico fue de 15 metros. El valor del indicador IR varía entre 0.85 y 0.99. Con respecto al indicador PPC, entre 92.73 y 100% lo que quiere decir que en el año 1940 se estaba consumiendo el total de la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, varía entre 2.64% y 2.88%.

Con respecto a la Entropía, el valor de este indicador aumenta a medida que pasa el tiempo pasando de 2.76 en 1940 a 5.6 en el 2015. Lo anterior quiere decir que el número de rutas de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente aumentan con el tiempo.

6.2.3.4 Cable de Salida de 8

El mayor desarrollo del sector Cable de Salida de 8 se presenta en el año 1979 con un porcentaje de desarrollo del 79%. El diámetro predominante en el año 1979 es de 3 in.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v) era mínimo. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1989 y 2015. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en los demás sectores.
- Teoría de grafos
 - ✓ Conectividad: El “Link Density” se mantiene relativamente constante, con un valor 0.011, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 50 que aumenta a medida que pasa el tiempo, pasando de un valor de 0.022 en el año 1979 a 0.054 en el 2015, esto quiere decir que la redundancia de la red aumentó a lo largo del tiempo.
 - ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red disminuye, pasa de 34 en 1979 a 32 en el 2015.

- ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C , el C_B aumenta con respecto al tiempo pasando de un valor de 0.239 en el año 1979 a 0.43 en el año 2015, esto indica que la vulnerabilidad de la red a daños en el nodo más central ha bajado a medida que pasa el tiempo. Con respecto al C_i^C los valores se mantienen entre 0.01 y 0.07 son valores muy cercanos a cero, los cuales indican que la eficiencia de difusión de información de la red no es buena.
- ✓ Diversidad: El valor de h (0.4) se mantiene constante con el tiempo.
- ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap disminuye a medida que pasa el tiempo, varía entre 0.152 y 0.08. Esto indica que en la actualidad la red es más vulnerable a la desconexión de algún nodo. Adicionalmente se puede afirmar que tuvo una alta posibilidad de extensión en el año 1979.

- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 15 metros. El valor del indicador IR se mantiene constante en 0.99. Con respecto al indicador PPC, este varía entre 99.84% y 99.95% lo que quiere decir que se está consumiendo casi el total de la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, varía entre 2.12% y 2.28%.

Con respecto a la Entropía, el valor de este indicador aumenta a medida que pasa el tiempo pasando de 4.25 en 1979 a 5.27 en el 2015. Lo anterior quiere decir que el número de rutas de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente aumentan con el tiempo.

6.2.3.5 T9-Belen

El mayor desarrollo del sector T9-Belen se presenta en el año 1987 con un porcentaje de desarrollo del 26%. El diámetro predominante en el año 1987 es de 3 in.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d y C_v) era mínimo. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1979 a 1987. Estos indicadores se comportan de manera similar a los calculados en los demás sectores.

- Teoría de grafos

- ✓ Conectividad: El “Link Density” tiene una tendencia a disminuir pasando de un valor de 0.018 en el 1961 a 0.007 en el 2014, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 55 que aumenta a medida que pasa el tiempo, pasando de un valor de 0.022 en el año

1961 a 0.052 en 1999, esto quiere decir que la redundancia de la red aumento a lo largo del tiempo.

- ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasando de 36 en 1961 a 61 en el 2014.
- ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C , el C_B disminuye con respecto al tiempo pasando de un valor de 0.54 en el año 1961 a 0.38 en al año 2014, esto indica que la vulnerabilidad de la red a daños en el nodo más central ha aumentado a medida que pasa el tiempo. Con respecto a C_i^C los valores varían entre 0.068 y 0.050 son valores muy cercanos a cero, los cuales indican que la eficiencia de difusión de información de la red no es buena.
- ✓ Diversidad: El valor de h (0.3) se mantiene constante con el tiempo.
- ✓ Robustez: El este caso el Spectral Gap no presenta ninguna tendencia, en algunas ocasiones su valor aumenta y en otras disminuye. Se puede afirmar que tuvo una alta posibilidad de extensión en el año 1961 con un valor de 0.129.
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico fue de 15 metros. El valor del indicador PPC, este varía entre 99.97% y 98.14% lo que quiere decir que se está consumiendo casi el total de la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, varía entre 2.02% y 1.62%.

Con respecto a la Entropía, el valor de este indicador aumenta a medida que pasa el tiempo pasando de 4.32 en 1961 a 5.78 en el 2014. Lo anterior quiere decir que el número de rutas de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente aumentan con el tiempo.

6.2.4 Cartagena

6.2.4.1 Las Lomas

El mayor desarrollo de este sector, se presenta entre los años 1991 y 2011, con un aumento del 59% de las tuberías. Los diámetro predominante en estos años fueron 6 y 4 in.

- Indicadores Geométricos: Se estableció anteriormente que el cambio en los indicadores geométricos (C_d , C_v , CPs) eran mínimos. La mayor variación de estos indicadores se presentó entre los años 1978 y 1991, como se puede observar en la Figura 32. Estos indicadores se

comportan de manera similar a los calculados en los demás sectores. Con respecto a el indicador C_p , se puede observar que tiene una mayor variación respecto a los demás, principalmente en el año 1978, esto se puede deber a el ajuste que se le realizo a la demanda por medio de la Ecuación 27, causando que los nodos con mayores demandas se fueran los que están más alejados de la fuente de abastecimiento del centro de la red.

- Teoría de grafos

- ✓ Conectividad: El “Link Density” varia de 0.021 en el año 1969 a 0.001 en el año 2011, es claro que tiene tendencia a disminuir, esto quiere decir que la densidad de los enlaces de la red es menor a la esperada a medida que pasa el tiempo, con respecto a MC se puede observar en la Tabla 61 que no presenta ninguna tendencia, el mayor valor del indicador MC es de 0.0495 y se presenta en el año 2011, esto quiere decir que es en el año 2011 donde la red cuenta con más circuitos, es decir es más redundante.
 - ✓ Eficiencia: En este caso el valor del diámetro de la red aumenta, pasa de 71 en 1969 a 115 en el 2011.
 - ✓ Centralidad: En este caso el C_B y C_i^C , el C_B aumenta a lo largo del tiempo, pasando de 0.30 a 0.52. Esto indica que la red se ha vuelto cada vez menos vulnerable a la falla del nodo más central. Con respecto al C_i^C los valores varían entre 0.04 y 0.023, lo que indica que la eficiencia de difusión en la red disminuye con el tiempo.
 - ✓ Diversidad: El valor de h aumenta, pasando de 0.213 a 0.306.
 - ✓ Robustez: En este caso el Spectral Gap muestra una tendencia a disminuir, pasando de un valor de 0.347 en 1969 a 0.0068 en el 2011. Es decir que la red es más vulnerable a desconexión al sufrir alguna falla aleatoria.
- Indicadores de Rendimiento Hidráulico: La presión mínima para realizar el análisis de rendimiento hidráulico en fue de 10 metros. El valor del indicador IR varía entre 0.27 a 0.51, mostrando que a medida que pasa el tiempo, la red tiene una mejor respuesta antes las fallas. Con respecto al indicador PPC, este varía desde 56.30% a 74.62, lo que indica que a medida que pasa el tiempo se consumiendo mayor porcentaje la energía disponible para suplir la demanda del sistema. Con respecto al indicador IRM, este varía entre 53.96% y 84.61 %.

Con respecto a la Entropía esta varía entre 1.45 y 5.58 lo que quiere decir que es que, a largo que pasa el tiempo, los nodos cuentan con más caminos de alimentación igualmente importantes que garantizan que la demanda en el nodo se suministre correctamente

7. DISCUSIÓN SOBRE LOS RESULTADOS

Se analizaron las características, geométricas, de funcionalidad, topológicas y de rendimiento hidráulico de RDAP de las 4 ciudades con mayor crecimiento demográfico de Colombia. En total se contó con la información hidráulica y topológica de 10 sectores hidráulicos, 2 correspondientes a la ciudad de Bogotá, otros 2 correspondiente a Santiago de Cali, 5 correspondientes a la ciudad de Manizales y 1 correspondiente a la ciudad de Cartagena.

Cada una de estas RDAP cuentan con propiedades topológicas e hidráulicas diferentes, pero, sin embargo, presentan comportamientos similares. Al aplicar los indicadores geométricos (C_d y C_v) en cada uno de los escenarios evaluados para las diferentes redes se pudo evidenciar que estos cambiaban un porcentaje muy bajo en el tiempo, esto se puede deber a que los diámetros de las tuberías varían solo entre 4 o 5 unidades, y por lo general las redes más antigua cuentas con diámetros superiores a 12 o 11 in y a medida que se van desarrollando los diámetros predominantes pasan a ser de 4 o 3 in. Es por lo que el mayor cambio de los indicadores geométricos se presenta generalmente en el año en que la RDAP se desarrolla en su mayor porcentaje. Esto se puede evidenciar en todos los casos de estudio analizados. Con respecto a los indicadores CP y CPs se puede afirmar que varían en mayor medida cuando la RDAP inicia su desarrollo, luego se esto su posición se mantiene relativamente constante, esto se debe a que el análisis hidráulico se realizó aplicando un factor de multiplicación que podía aumentar o disminuir la demanda a lo largo del tiempo, todo dependía principalmente de la proyección del número de suscriptores en la zona, pero como este factor fue aplicado a todos los nodos por igual la distribución de la demanda no cambio y por lo tanto los indicadores que depende de ella tampoco.

Por otro lado, fue sencillo identificar en cada uno de los sectores hidráulicos y escenarios planteado el punto en que la RDAP cambia su función principal, esta clasificación se realizó a partir del indicador “*Length-weighted average pipe diameter*”, y se comportó de manera similar para todos los casos.

Con respecto a los indicadores de Teoría de Grafos se obtuvieron valores similares entre los casos analizados y los establecidos en la literatura. En relación con el atributo topológicos de conectividad, el mayor valor del indicador “*Link Density*” se presentó en el sector hidráulico, Bajo Rosales, en el año 1977 con un valor de 0.11, esto se debe a que el número de nodos y enlaces eran iguales. Con respecto al indicador “*Average Node Degree*”, en todos los casos se obtuvo un valor igual o alrededor de 2, y por último el “*Meshedness Coefficient*” en algunas ocasiones se

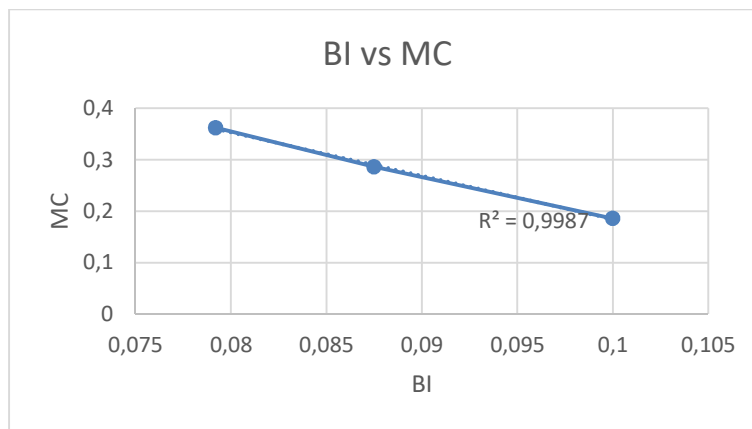
presentaba el mayor valor de MC en la RDAP más antigua del sector, puesto que a medida que se iba desarrollando tomaba una estructura más ramificada, un ejemplo de esto es el Sector 25 de la ciudad de Bogotá, donde el mayor valor del MC (0.77) se obtuvo en el año 1969, y fue disminuyendo medida que pasaba el tiempo, un ejemplo de lo contrario es el sector hidráulico RBS-22 de la ciudad de Santiago de Cali con un valor de MC(0.1) en el año 2017, siendo este el RDAP estudiada con mayor valor de MC y con una estructura topológica más parecido a una maya. Es de suma importante resaltar que estos indicadores dependen únicamente de la estructura de la red y del tamaño de esta, por ende, no se puede establecer si una red tiene mejores características topológicas a partir de los indicadores de conectividad.

También se evaluó el atributo topológico de eficiencia en los diferentes casos de estudio y sus respectivos escenarios, esta característica topológica simplemente indica la extensión en términos geodésicos de la red por lo tanto no puede ser un parámetro de comparación.

Se debe aclarar que, a pesar de que la clasificación de la RDAP por medio de la teoría de grafos puede desempeñar un papel importante en la evaluación del comportamiento de las RDAP (Giustolisi et al., 2017). Se debe tener en cuenta que las métricas estrictamente topológicas solo pueden describir parcialmente la estructura de la red y no caracterizar completamente sus propiedades. Puesto que una evaluación detallada de la resistencia de las RDAP no depende únicamente de la estructura de la red si no de información, como la ubicación de las válvulas de aislamiento y los tanques. Lo anterior demuestra que la simplificación del sistema como un grafo abstracto es realmente útil pero no es suficiente para realizar una evaluación completa de la resistencia del sistema y su robustez contra fallas en el sistema. (Yazdani et al., 2011).

A pesar de que los indicadores de centralidad y robustez están en función de la topología de la red, estos junto al MC indican que tan redundante y robusta es una red, y pueden servir para identificar que tan vulnerable es una red ante un evento de falla aleatorio.

En relación con el “Branch Index” se puede afirmar que clasifica las RDAP de manera adecuada, en esta investigación se analizaron redes con un BI de 1 hasta redes con un BI muy cercano a cero. De acuerdo a la definición de BI se esperaría que este indicador presentara una correlación fuerte con el indicador MC. Esto se puede ver reflejado en la Gráfica 75.



Gráfica 75 BI vs MC

Por último, están los indicadores de rendimiento hidráulico, es decir, el IR, IRM, PPC, y la Entropía, con respecto a la Entropía se puede afirmar que se obtuvieron resultados similares en cada uno de los casos de estudio y que en su gran mayoría se mostraba como una propiedad de aumentaba en el tiempo, es decir que es posible garantizar que en el momento de que ocurra una falla en el sistema, los nodos contarán con rutas diferentes pero igualmente importantes para suministrar la demanda requerida.

En cuando al IR y IRM se puede afirmar que en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados incoherentes, a excepción del sector Las Lomas, los valores de IR variaban entre 0.9 y 0.99 para la mayoría de casos de estudio, lo que indicaría, que casi todas las RDAP evaluadas cuentan con una capacidad excedentaria alta, incluso en las horas de máxima demanda, sin embargo estos resultados no concuerda con los valores obtenidos de IRM, los cuales variaban desde aproximadamente 0.5% hasta 7%, lo cual indica que LGH de los nodos esta únicamente un 10% por encima de la LGH mínima mostrando así que el sistema no es resiliente. Otro indicador que soporta esta inconsistencia es el PPC, ya que, este representa el porcentaje de energía disponible que se usa para suplir la demanda y en la mayoría de los casos el porcentaje de energía usada era cercano al 100% confirmando así que las RDAP estudiadas en esta investigación no cuentan con una capacidad alta de respuesta ante una falla.

Es posible que esta inconsistencia en el cálculo del indicador se deba a la suposición de demandas planteadas con el fin de poder realizar un análisis del rendimiento hidráulico a lo largo de la historia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La información suministrada por las Empresas de Acueducto fue de gran utilidad para realizar la presente investigación, pero debido a que no se contaba con información histórica de las RDAP en

Colombia y la información recibida estaba en diferentes tipos de formatos, fue necesario realizar un manejo de datos extenso, el cual tomo más tiempo de lo esperado.

- Los Indicadores Geométricos utilizados para evaluar las diferentes RDAP no presentan cambios significativos a medida que pasa el tiempo a pesar de que dependen de las características topológicas de la Red.
- Los Indicadores de Teoría de Grafos, y en general los que dependen de las características topológicas de la RDAP, toman diferentes ordenes de magnitud dependiendo del tamaño de la Red, por esta razón solo es posible realizar comparaciones entre la misma red expuesta a diferentes escenarios.
- Los Indicadores de Rendimiento Hidráulico también son comparables únicamente si se cuenta con diferentes escenarios de la misma Red, en esta ocasión se pudo observar que en la mayoría de los casos el cambio no era significativo.
- La RDAP de Colombia cuenta con estructuras topológicas variadas, desde redes con estructuras tipo ramificado hasta redes con estructuras tipo maya, debido a esto fue posible realizar un análisis exhaustivo del comportamiento de las RDAP en Colombia a partir de indicadores geométricos, funcionales, de Teoría de Grafos y de Rendimiento Hidráulico.
- Fue posible evidenciar que no existe una relación significativa entre los indicadores basados únicamente en la topología y en los de rendimiento hidráulico, ya que, si algún indicador topológico mostraba características de redundancia en la red, es decir, alta capacidad a resistir fallas, esto no se veía reflejado en los indicadores de rendimiento hidráulico.
- Se recomienda realizar el trazado de las RDAP basándose en mejorar características como la redundancia y robustez de la red y no en el trazado de otras estructuras que hacen partes de las ciudades, ya que esto crea una restricción espacial del desarrollo de las características tipológicas e hidráulicas de la red.
- Se recomienda realizar una revisión temprana de vulnerabilidad de las redes existente a partir de los indicadores topológicos e hidráulicos propuestos por los diferentes autores, con el fin de tomar mejores decisiones a la hora de realizar una planificación estratégica, centradas en mejorar la resistencia de la red a perturbaciones y fallas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, M. J., & López, F. S. (2017). Water Distribution System of Bogotá City and Its Surrounding Area, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAB E.S.P. *Procedia Engineering*, 186, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.281>
- Angulo, F., Urueta, E., Valverde, G., & Paternina, O. (2017). Cartagena ' s Water Distribution System. *Procedia Engineering*, 186, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.204>
- Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N., Solé, R. V., Valverde, S., Kuntz, P., & Theraulaz, G. (2006). Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. *The European Physical Journal B*, 49(4), 513–522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>

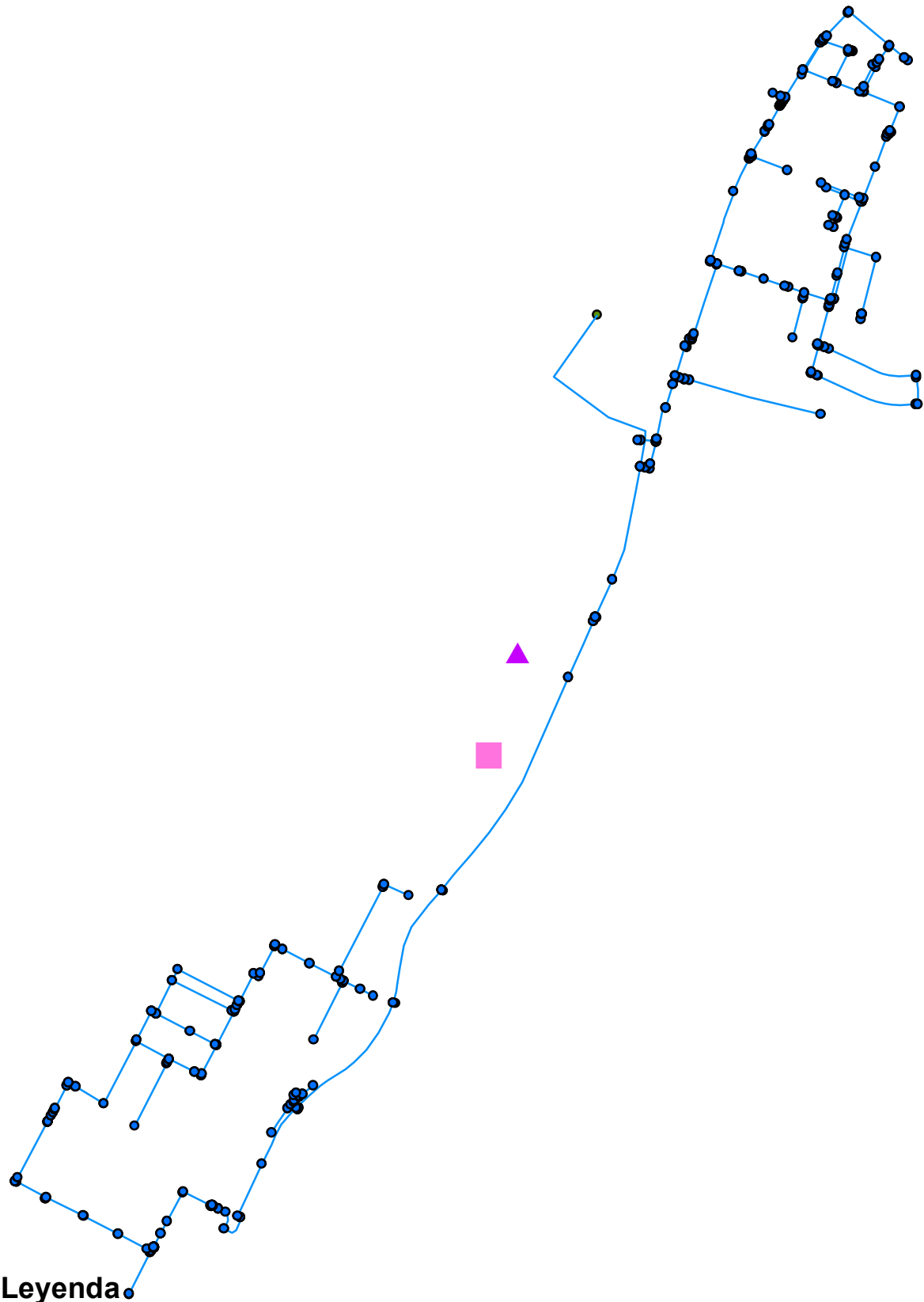
- Creaco, E., Fortunato, A., Franchini, M., & Mazzola, M. R. (2014). Comparison between entropy and resilience as indirect measures of reliability in the framework of water distribution network design. *Procedia Engineering*, 70, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.043>
- Creaco, E., Franchini, M., Walski, T. M., & Asce, F. (2015). Taking Account of Uncertainty in Demand Growth When Phasing the Construction of a Water Distribution Network, 141(2), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000441).
- DANE. (1993). Perfil Sociodemografico de Manizales por Comunas y Barrios.
- Echeverri, M. J. (2017). Manizales' Water Distribution System -Aguas de Manizales S.A. E.S.P. *Procedia Engineering*, 186(6), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.205>
- Estrada, E. (2006). Network robustness to targeted attacks. the interplay of expansibility and degree distribution. *European Physical Journal B*, 52(4), 563–574. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00330-7>
- Freeman, L. . (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness Author (s): Linton C . Freeman Published by : American Sociological Association Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3033543> Accessed : 18-04-2016 12 : 00 UTC Your use of the JSTOR archive indicat. *Sociometry*, 40(1), 35–41.
- Giustolisi, O., Ridolfi, L., & Simone, A. (2019). Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks. *Water Resources Research*, 55(3), 2348–2369. <https://doi.org/10.1029/2018WR023966>
- Giustolisi, O., Simone, A., & Ridolfi, L. (2017). Network structure classification and features of water distribution systems. *Journal of the American Water Resources Association*, 53, 3407–3423. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Hwang, H., & Lansey, K. (2017). Water Distribution System Classification Using System Characteristics and Graph-Theory Metrics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(12), 04017071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000850](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000850)
- Meng, F., Fu, G., Farmani, R., Sweetapple, C., & Butler, D. (2018). Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems. *Water Research*, 143, 376–386. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.048>
- Ministerio de Vivienda. (2010). *Título B. Sistemas de Acueducto. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Retrieved from http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOB_030714.pdf
- Moreno, C., Rojas, D., & Saldarriaga, J. (2018). RELATION BETWEEN POPULATION DENSITY AND TOPOLOGY IN POTABLE WATER DISTRIBUTION NETWORKS Methodology Optimal Design of RDAP.

-
- Newman, M. E. J. (2002). Assortative Mixing in Networks. *Physical Review Letters*, 89(20), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.208701>
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Moreno, M. E., Romero, N., & Cortés, O. J. (2010). Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water Journal*, 7(2), 121–140. <https://doi.org/10.1080/15730620903447621>
- Secretaría de Desarrollo Territorial y Bienestar. (2017). *Ficha de caracterización socio-economica de los abrrios de Santiago de Cali*.
- Tanyimboh, T. T. (2017). Informational Entropy : a Failure Tolerance and Reliability Surrogate for Water Distribution Networks, 3189–3204. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1684-8>
- Tanyimboh, T. T., Siew, C., & Saleh, S. (2016). Comparison of Surrogate Measures for the Reliability and Redundancy of Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 3535–3552. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1369-8>
- Yazdani, A., Otoo, R. A., & Jeffrey, P. (2011). Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1574–1582. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.016>
- Zischg, J., Rauch, W., & Sitzenfrei, R. (2018). Morphogenesis of Urban Water Distribution Networks: A Spatiotemporal Planning Approach for Cost-Efficient and Reliable Supply. *Entropy*, 20(9), 708. <https://doi.org/10.3390/e20090708>

10. ANEXOS

SECTOR 18

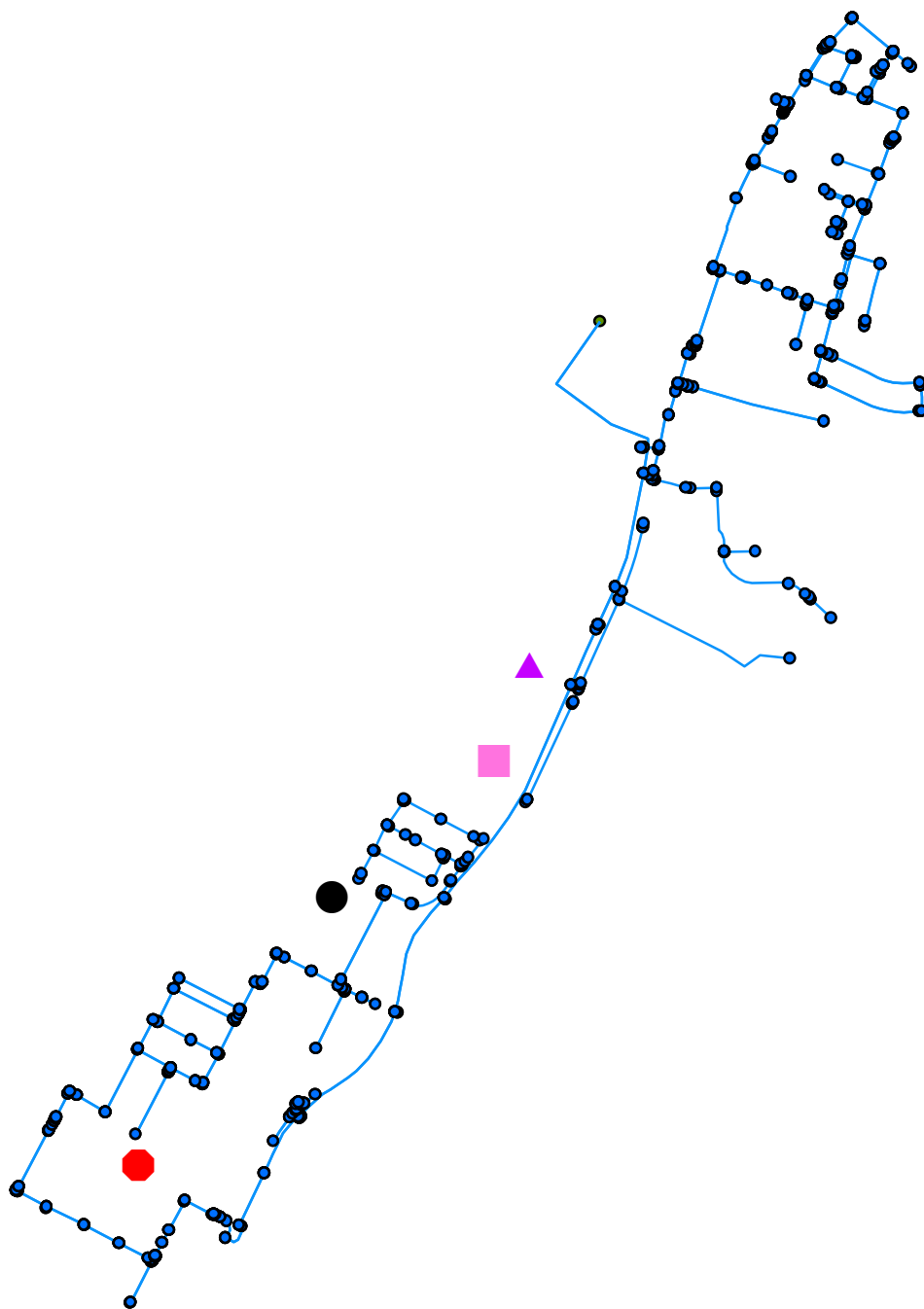
Indicadores Geométricos RDAP 1969



Leyenda

- CV 1969
- ▲ CD 1969

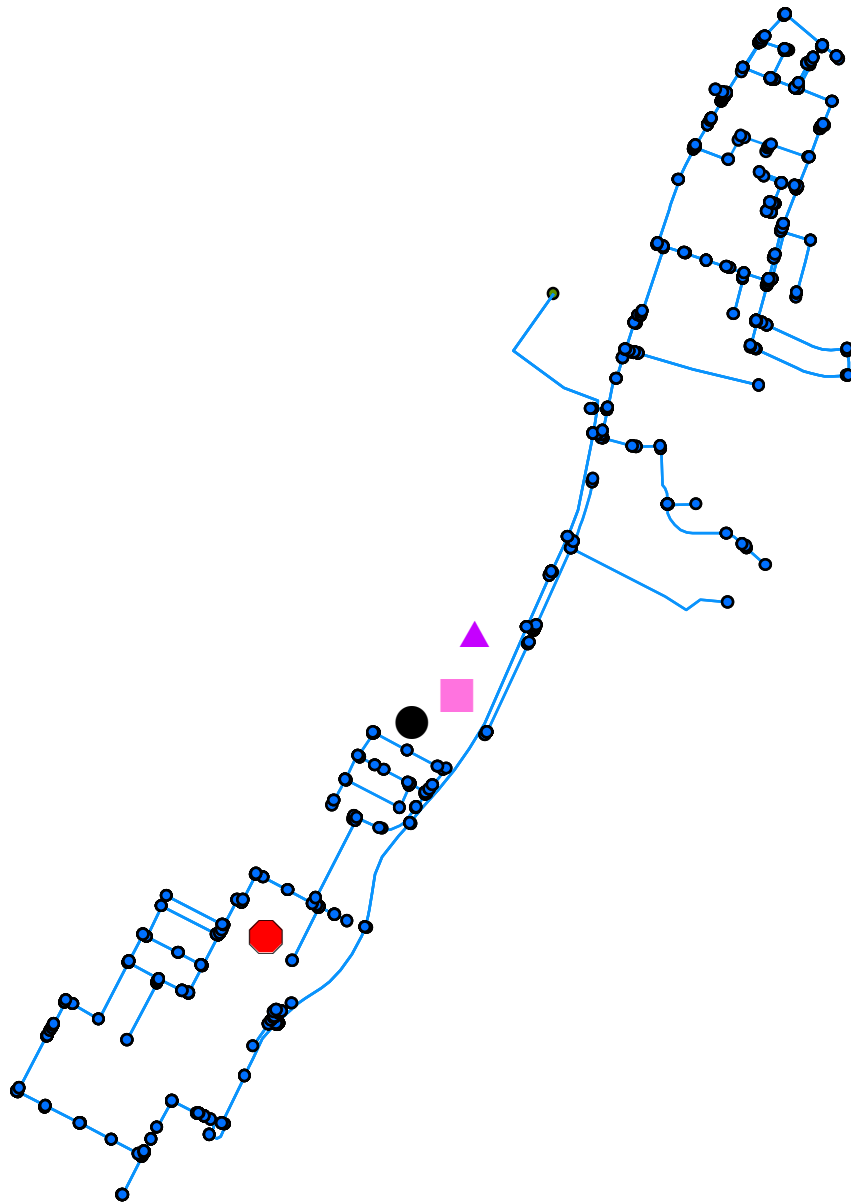
Indicadores Geométricos RDAP 1975







Leyenda

- CPs 1975
- CP 1975
- CV 1975
- ▲ CD 1975

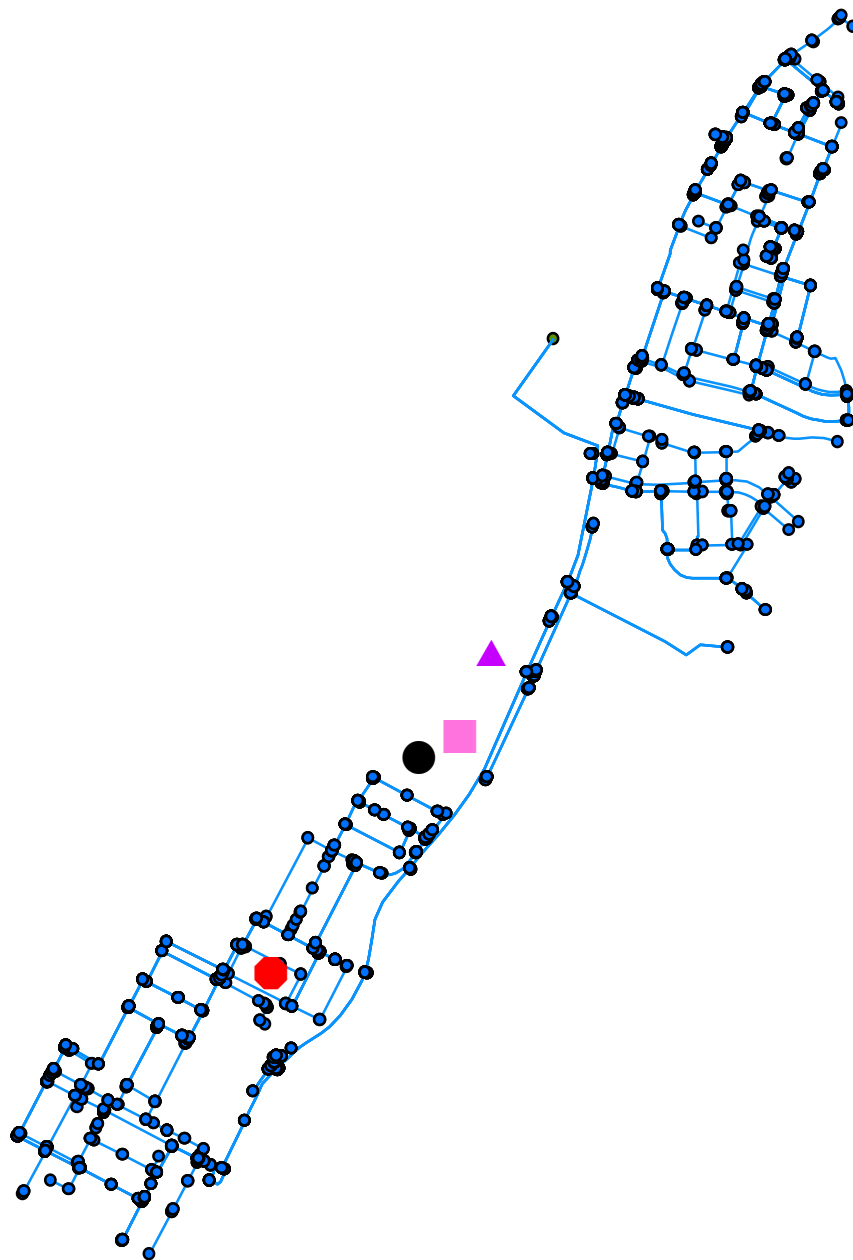
Indicadores Geométricos RDAP 1986



Leyenda

-  CPs 1986
-  CP 1986
-  CV 1986
-  CD 1986

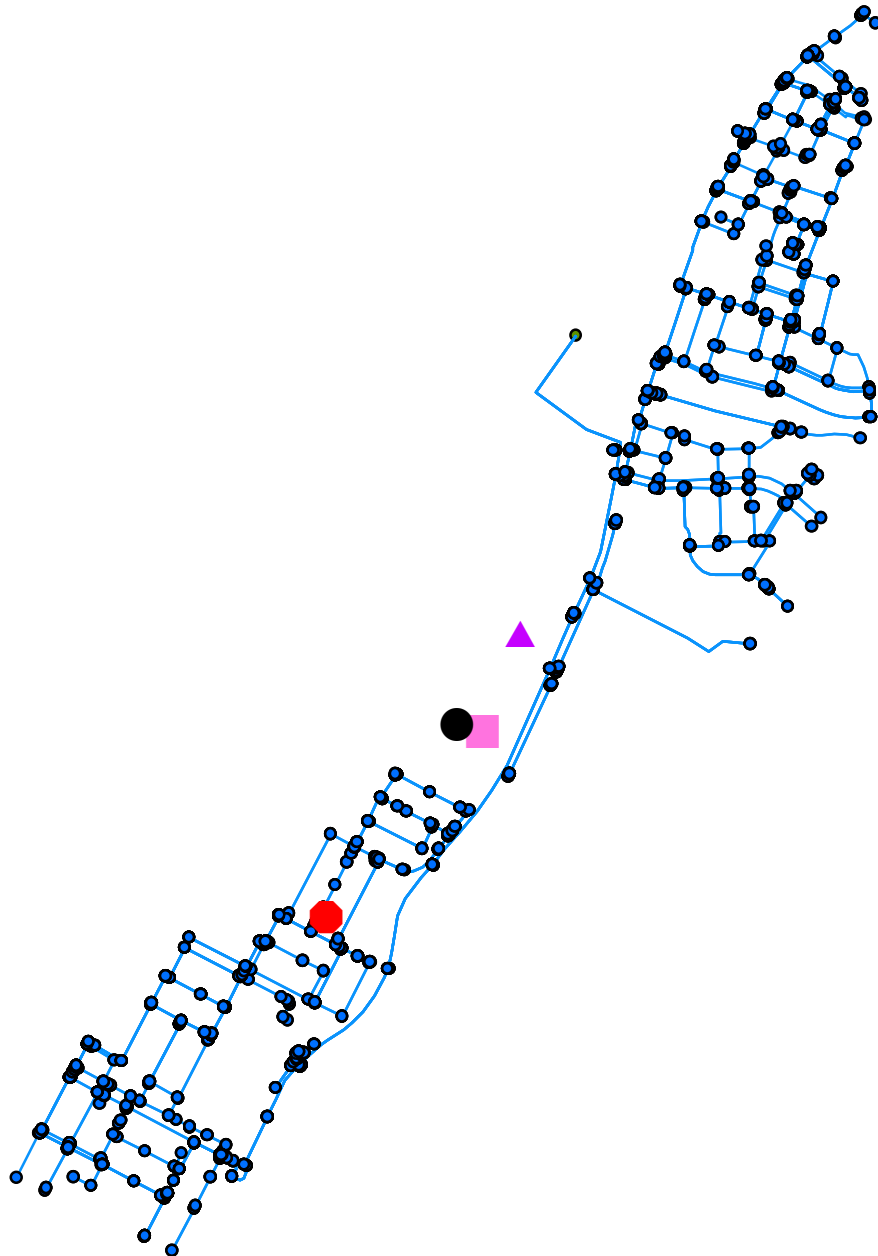
Indicadores Geométricos RDAP 1994







Leyenda

- CPs 1994
- CP 1994
- CV 1994
- ▲ CD 1994

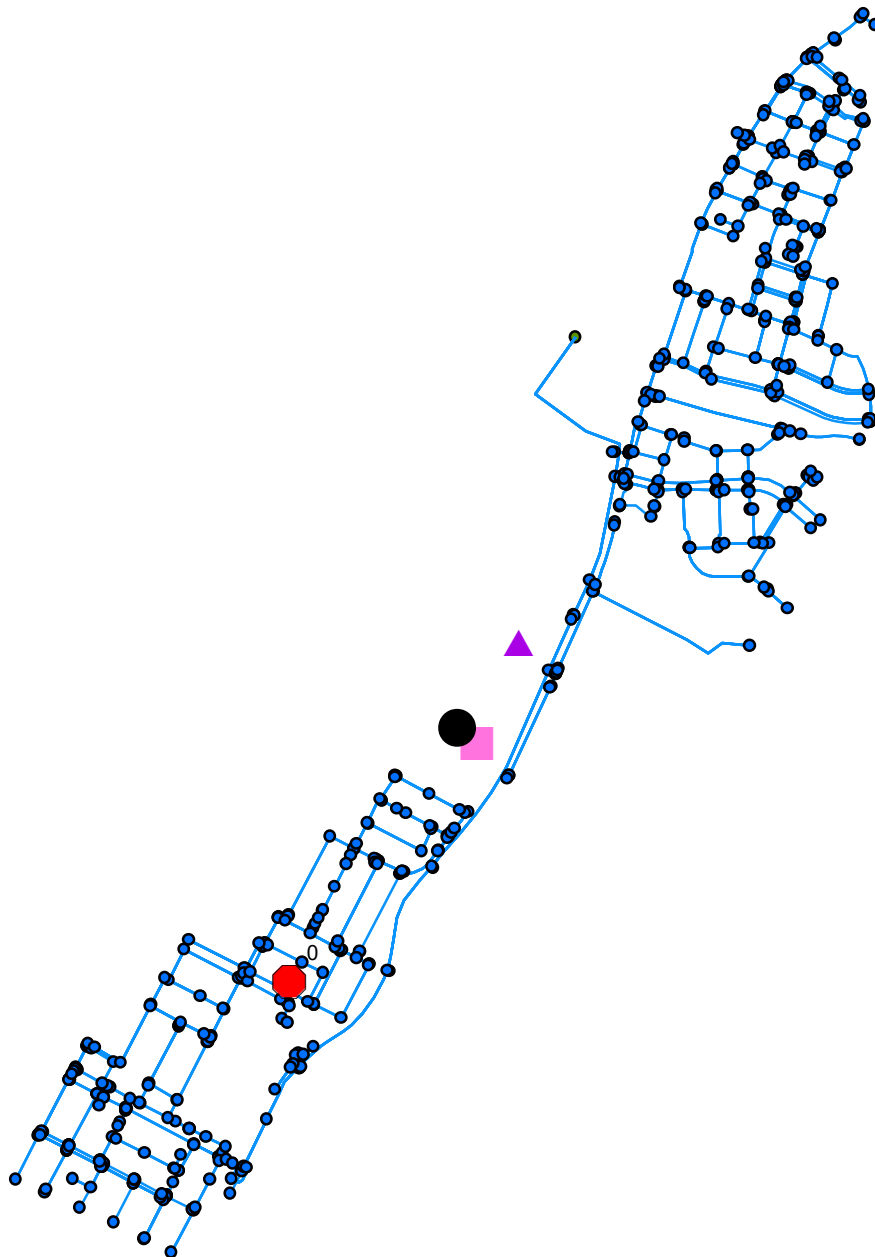
Indicadores Geométricos RDAP 2005



Leyenda

-  CPs 2005
-  CP 2005
-  CV 2005
-  CD 2005

Indicadores Geométricos RDAP 2013

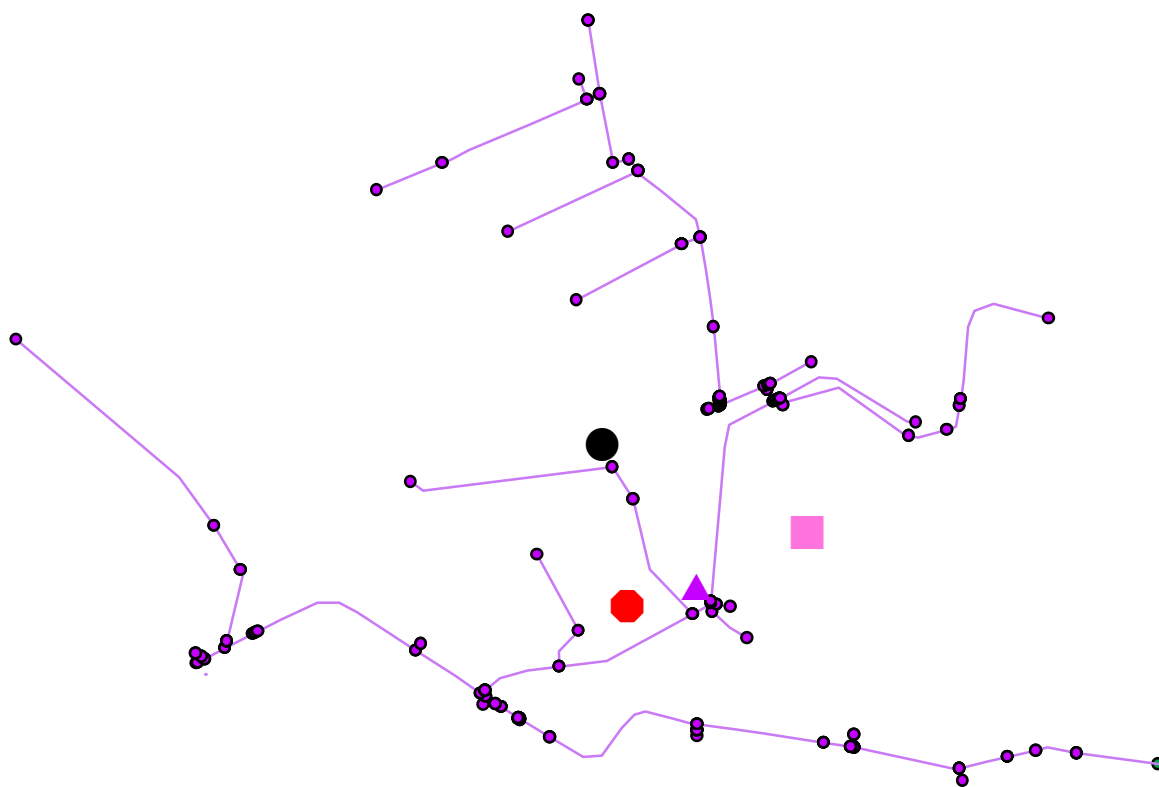


Leyenda





-  CPs 2013
-  CP 2013
-  CV 2013
-  CD 2013

SECTOR 25

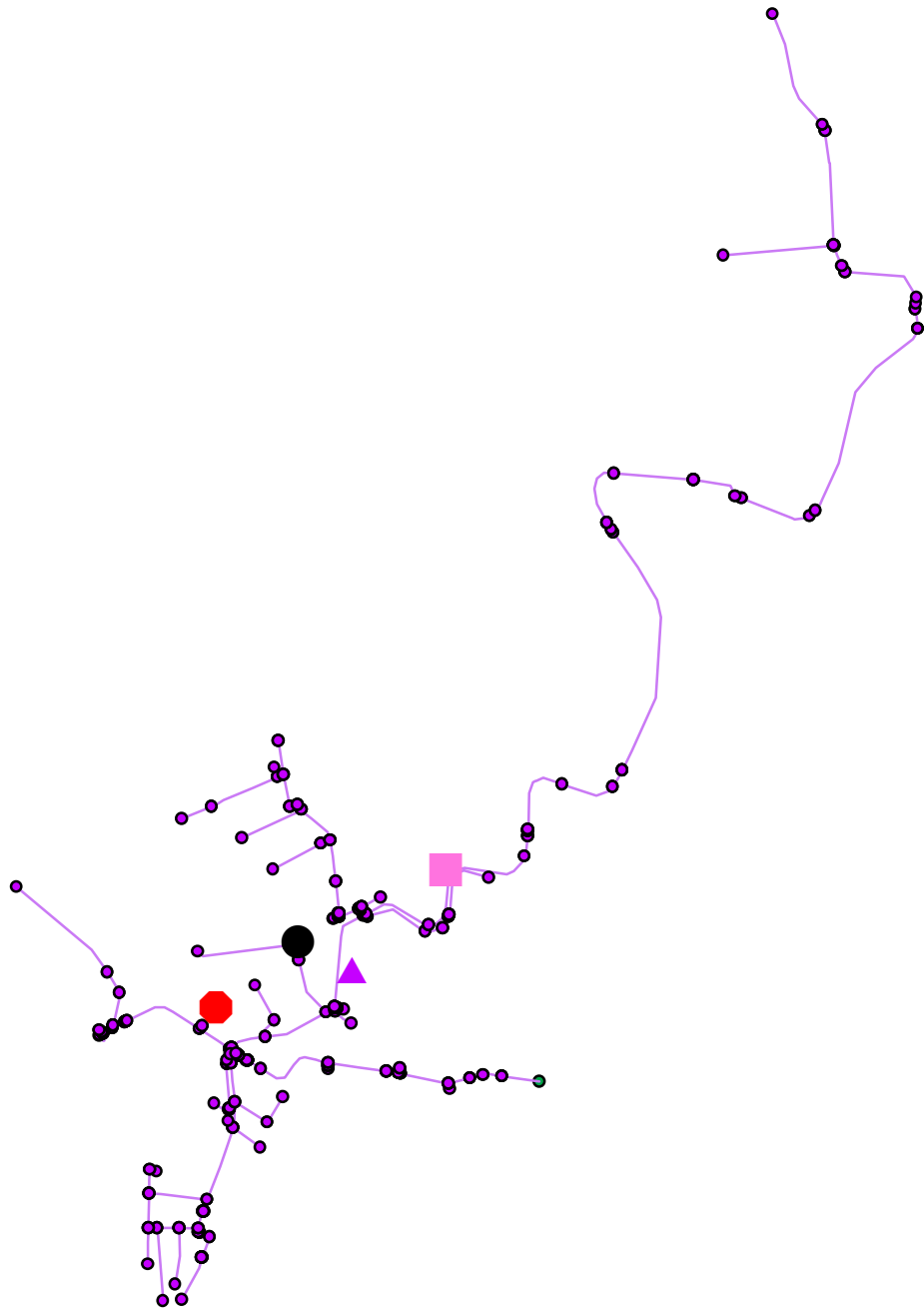
Indicadores Geométricos RDAP 1969







Leyenda

-  CPs 1969
-  CP 1969
-  CV 1969
-  CD 1969

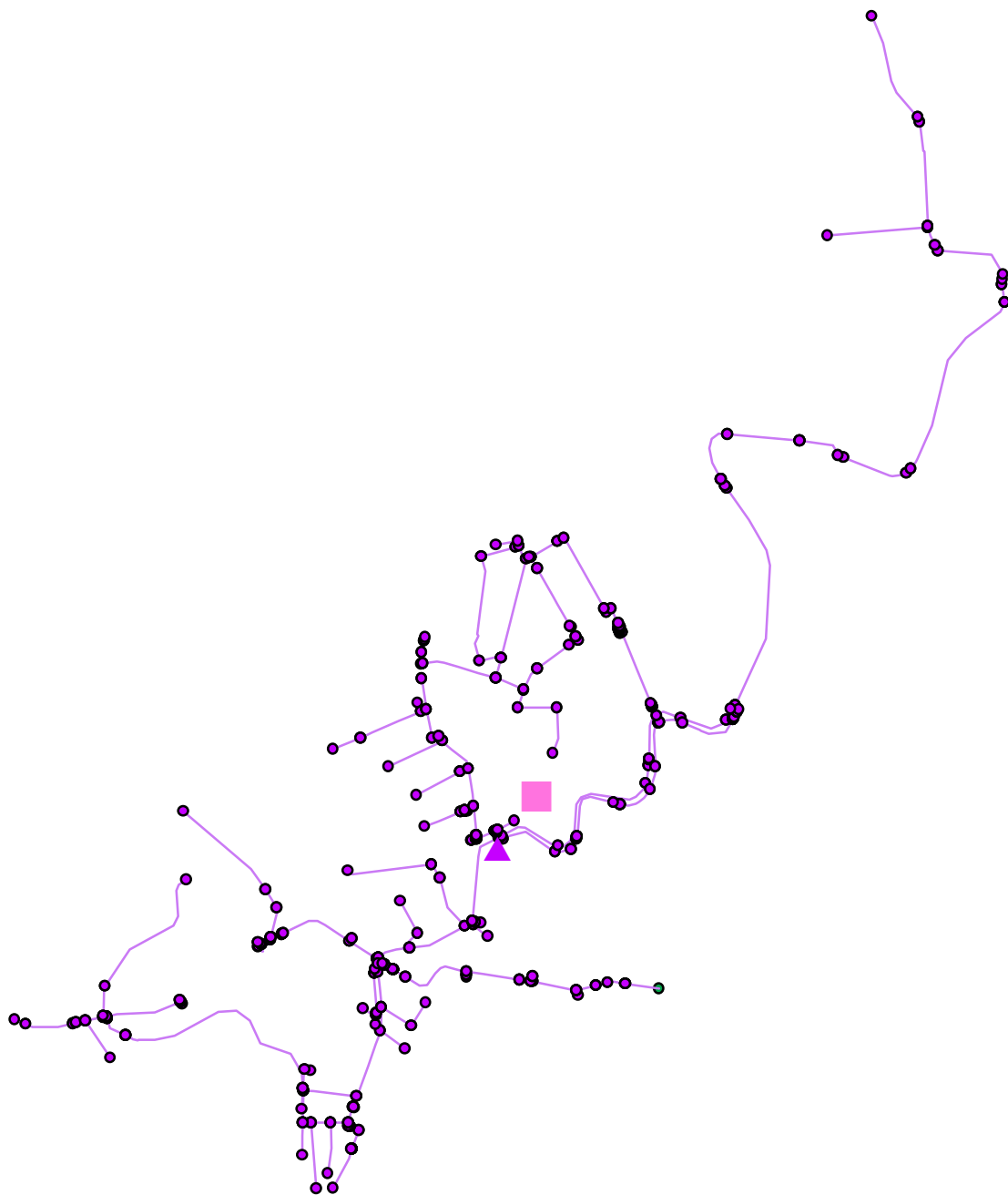
Indicadores Geométricos RDAP 1975





Leyenda

-  CPs 1975
-  CP 1975
-  CV 1975
-  CD 1975

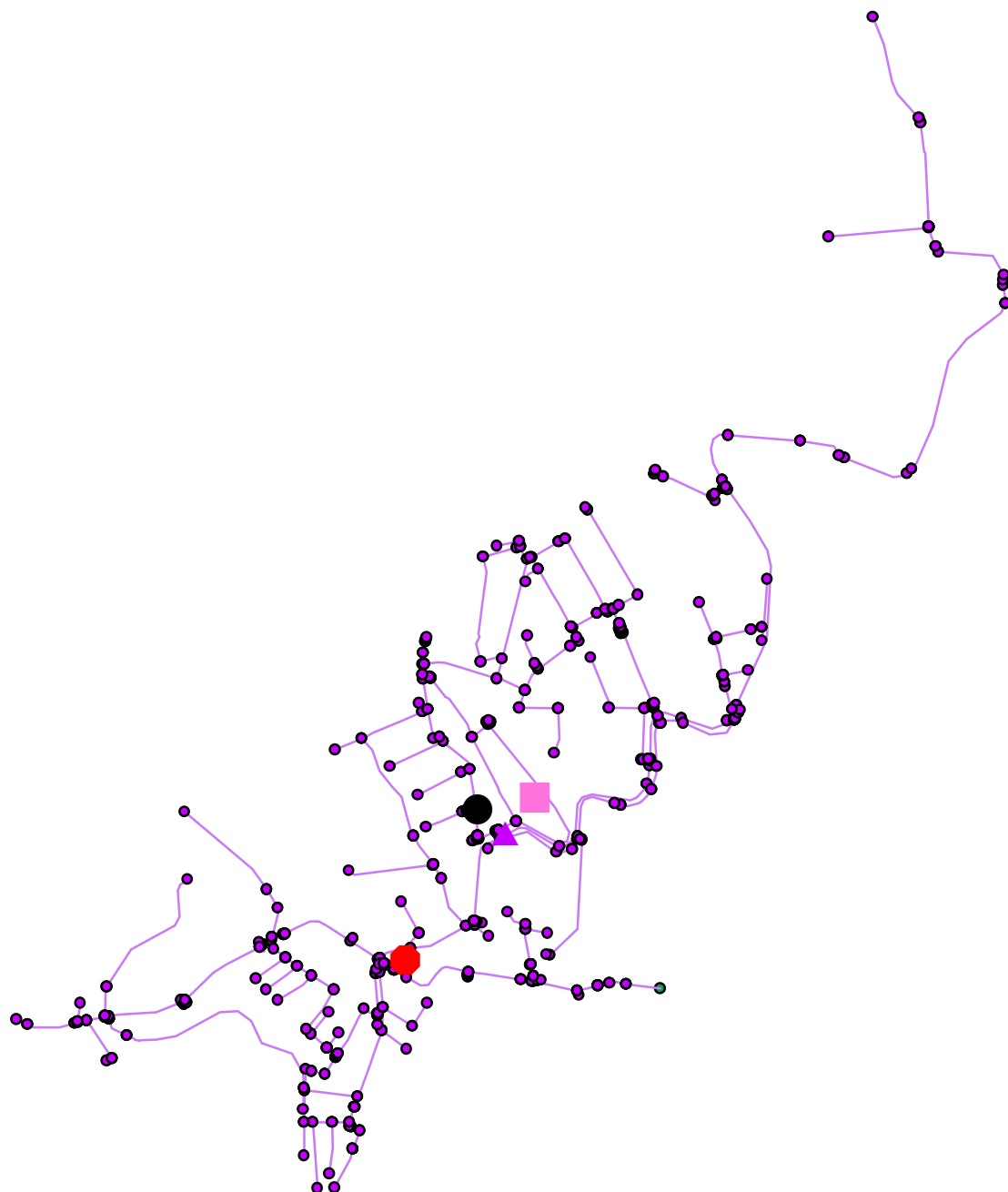
Indicadores Geométricos RDAP 1980







Leyenda

-  CV 1980
-  CD 1980

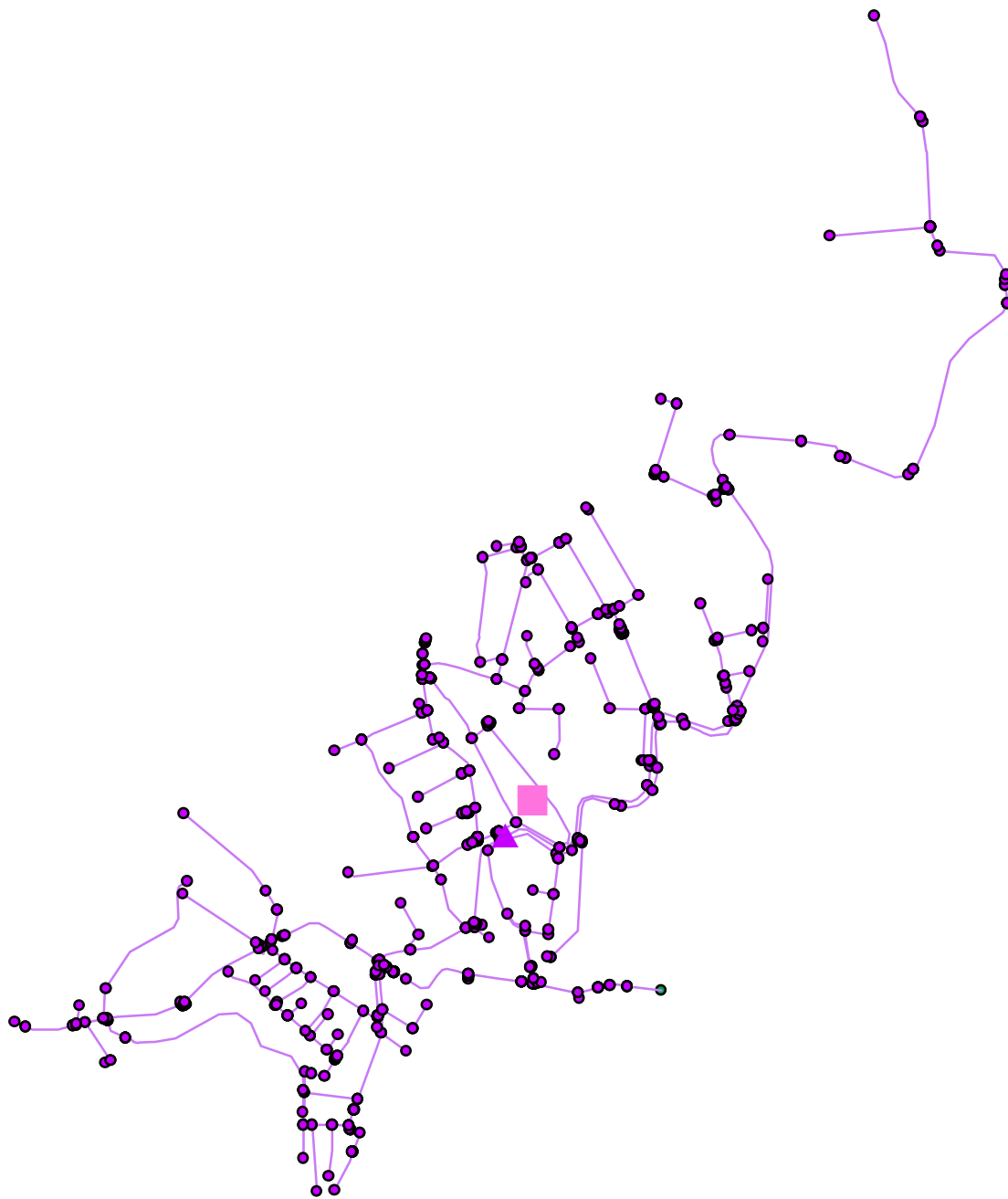
Indicadores Geométricos RDAP 1990





Leyenda

-  CPs 1990
-  CP 1990
-  CV 1990
-  CD 1990

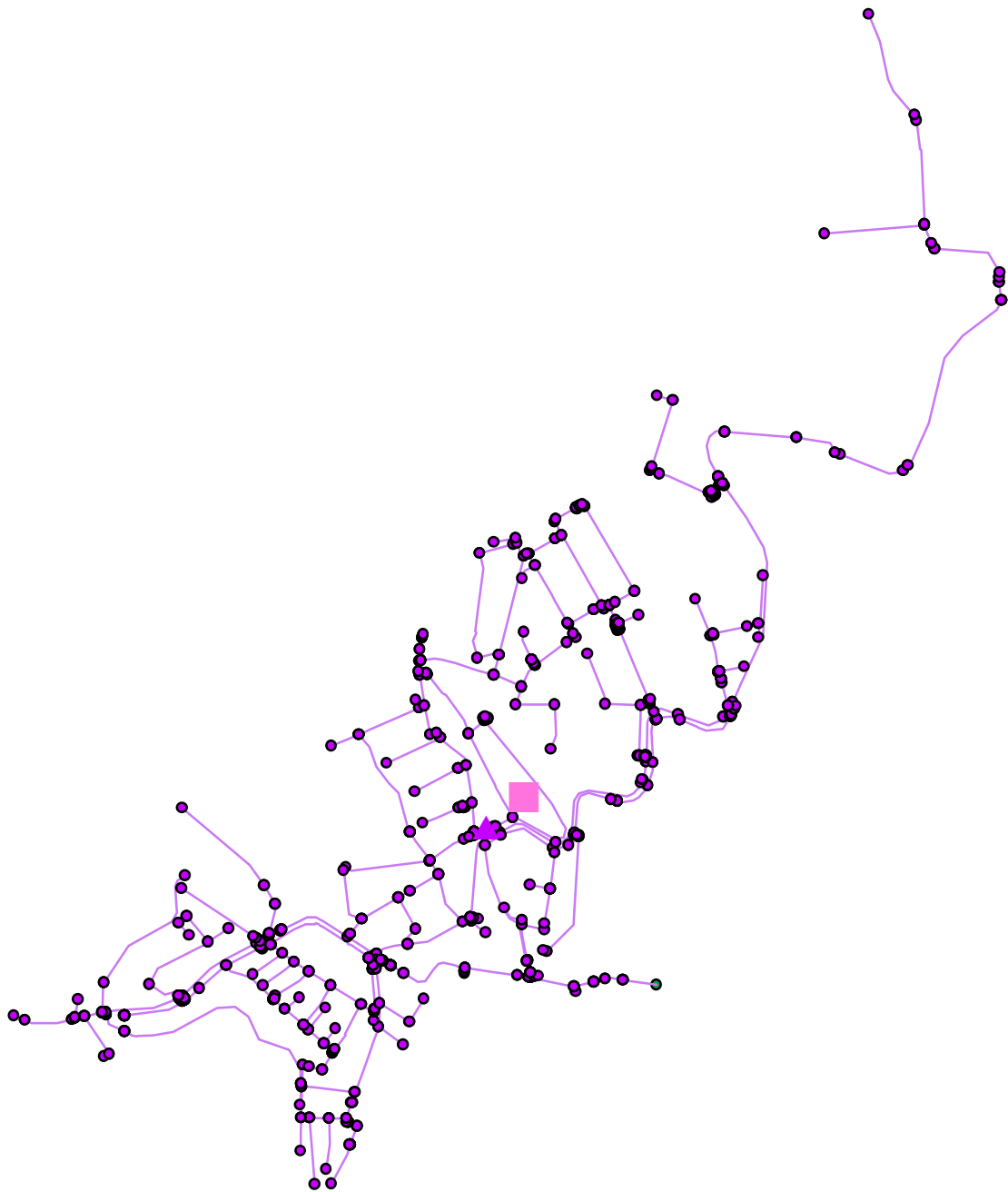
Indicadores Geométricos RDAP 2000



Leyenda

-  CV 2000
-  CD 2000

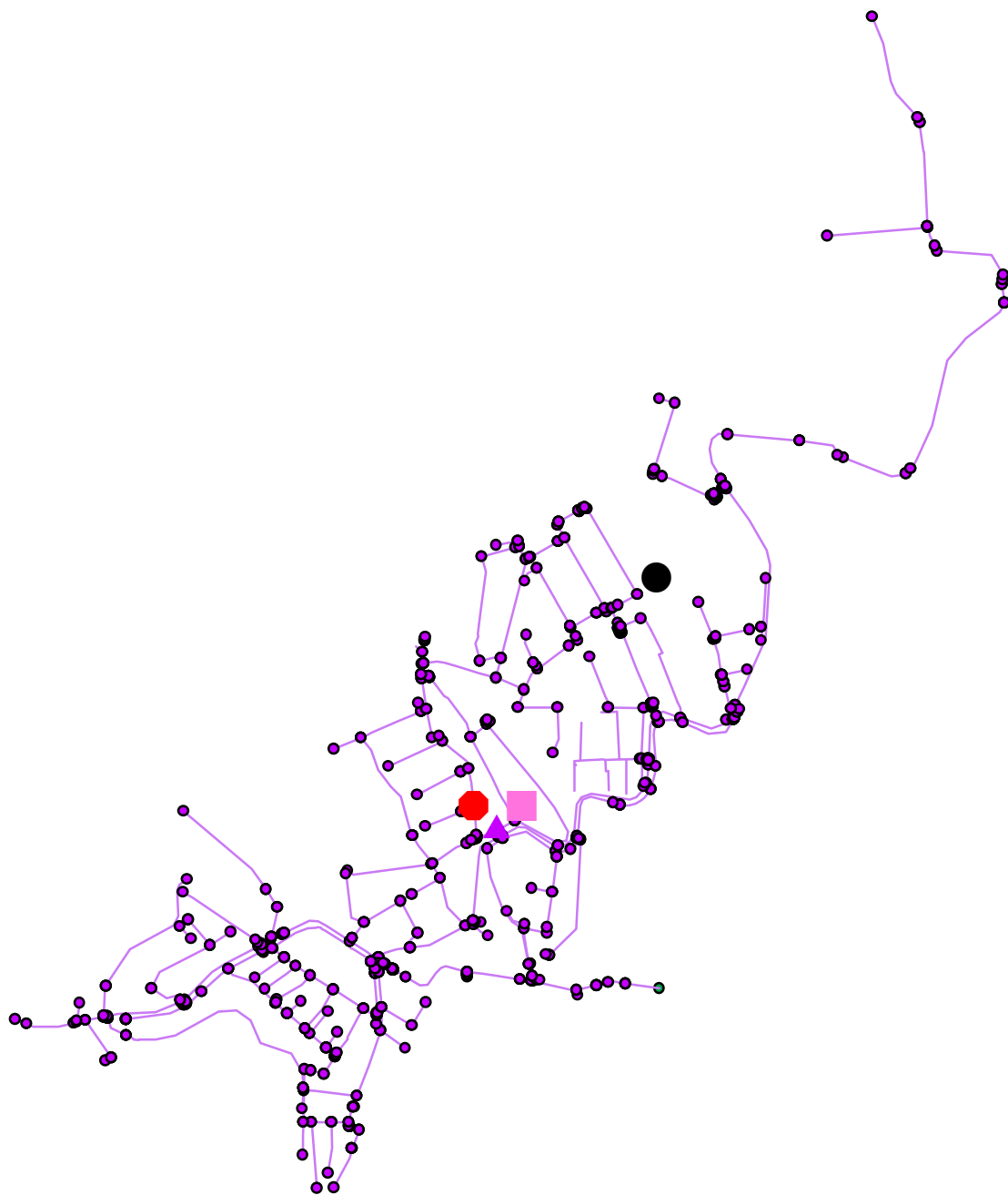
Indicadores Geométricos RDAP 2005







Leyenda

- CV 2005
- ▲ CD 2005

Indicadores Geométricos RDAP 2009

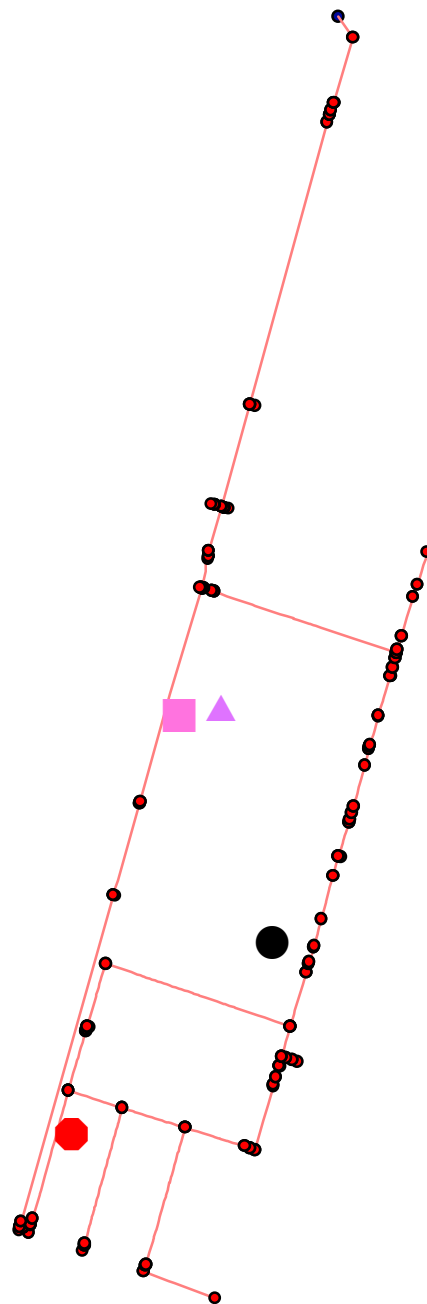


Leyenda

-  CPs 2009
-  CP 2009
-  CV 2009
-  CD 2009

RBS-19

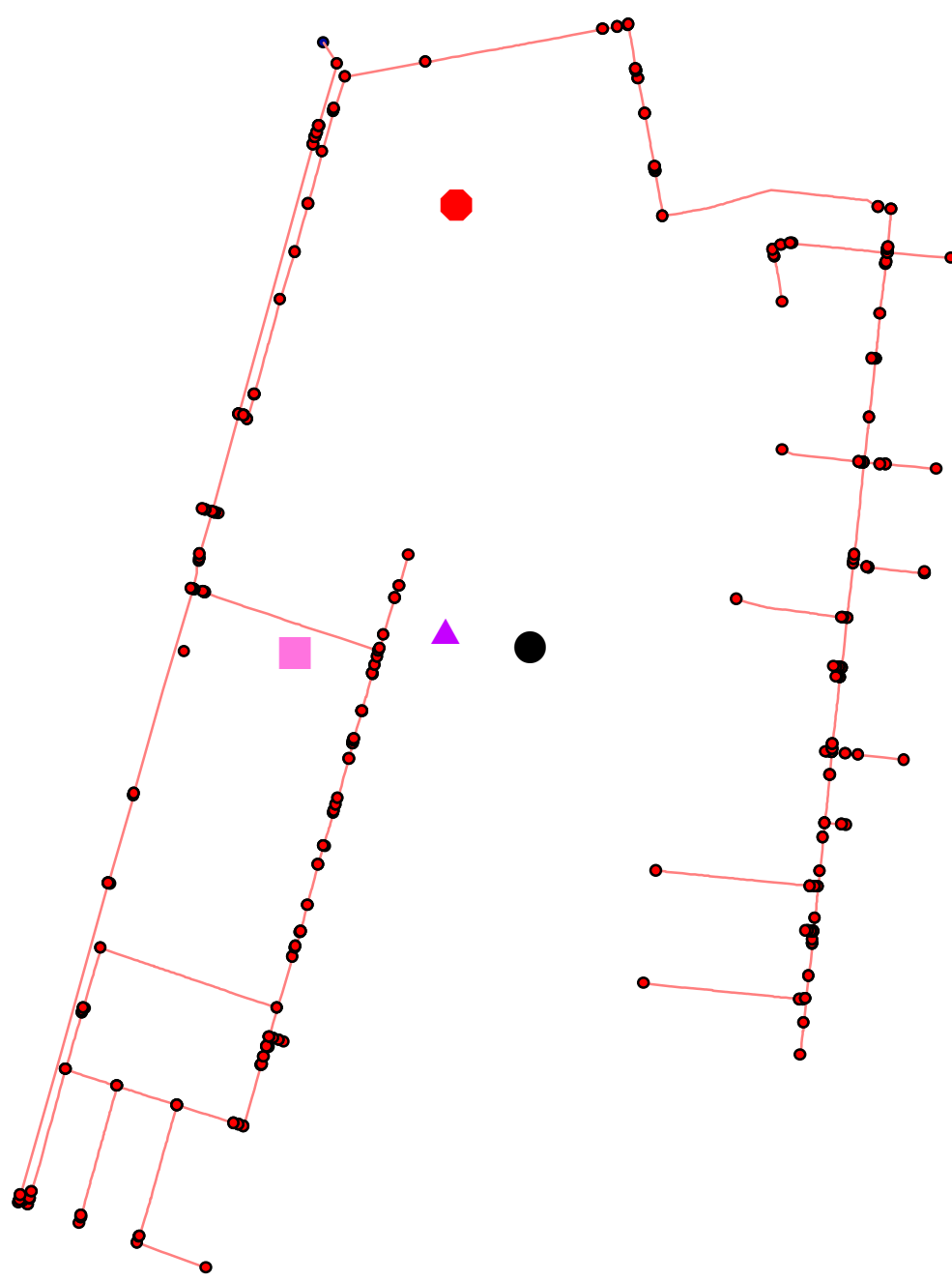
Indocadores Geométricos RDAP 1965







Leyenda

- CPs 1965
- CP 1965
- CV 1965
- ▲ CD 1965

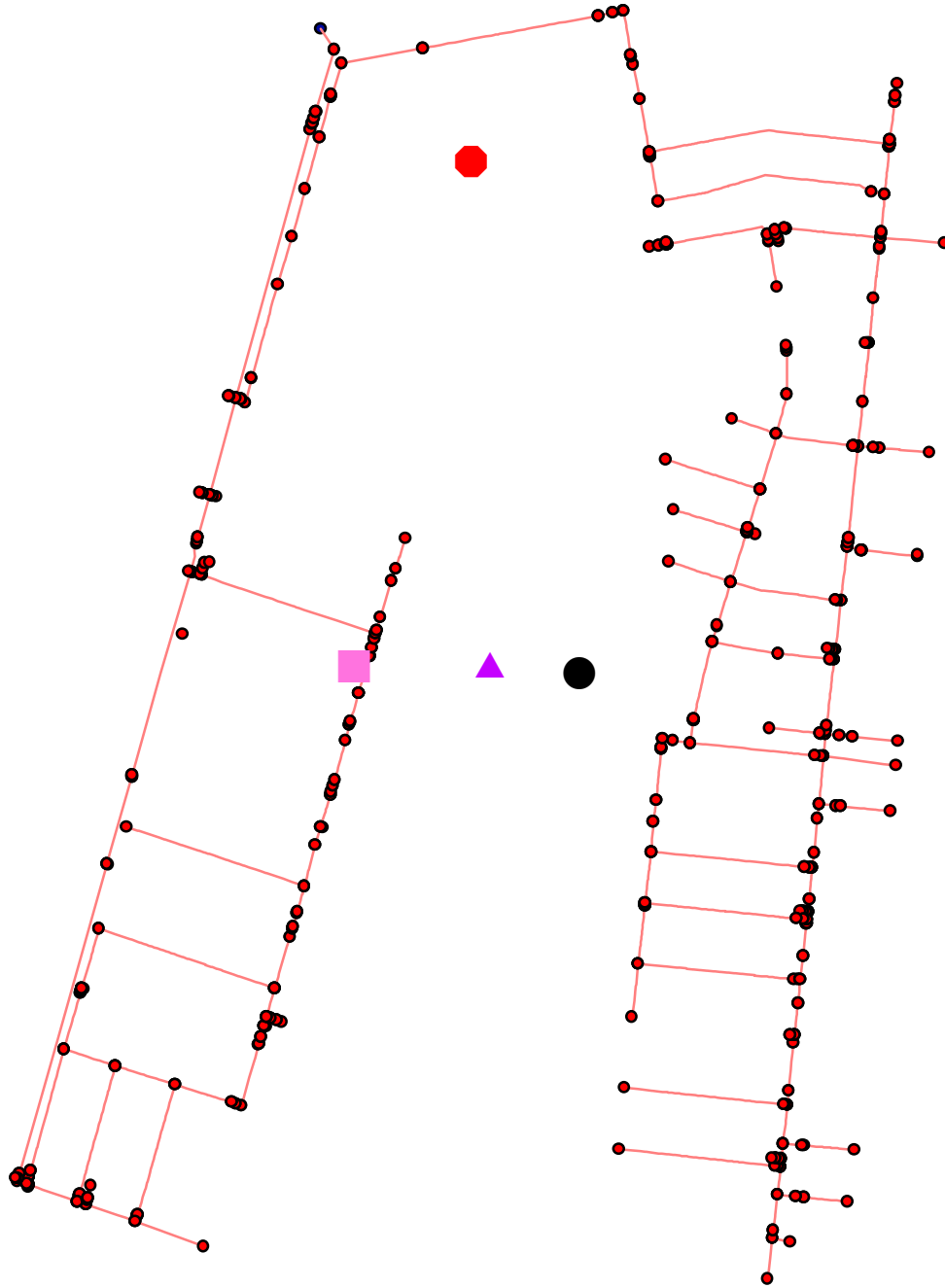
Indocadores Geométricos RDAP 1968







Leyenda

-  CPs 1968
-  CP 1968
-  CV 1968
-  CD 1968

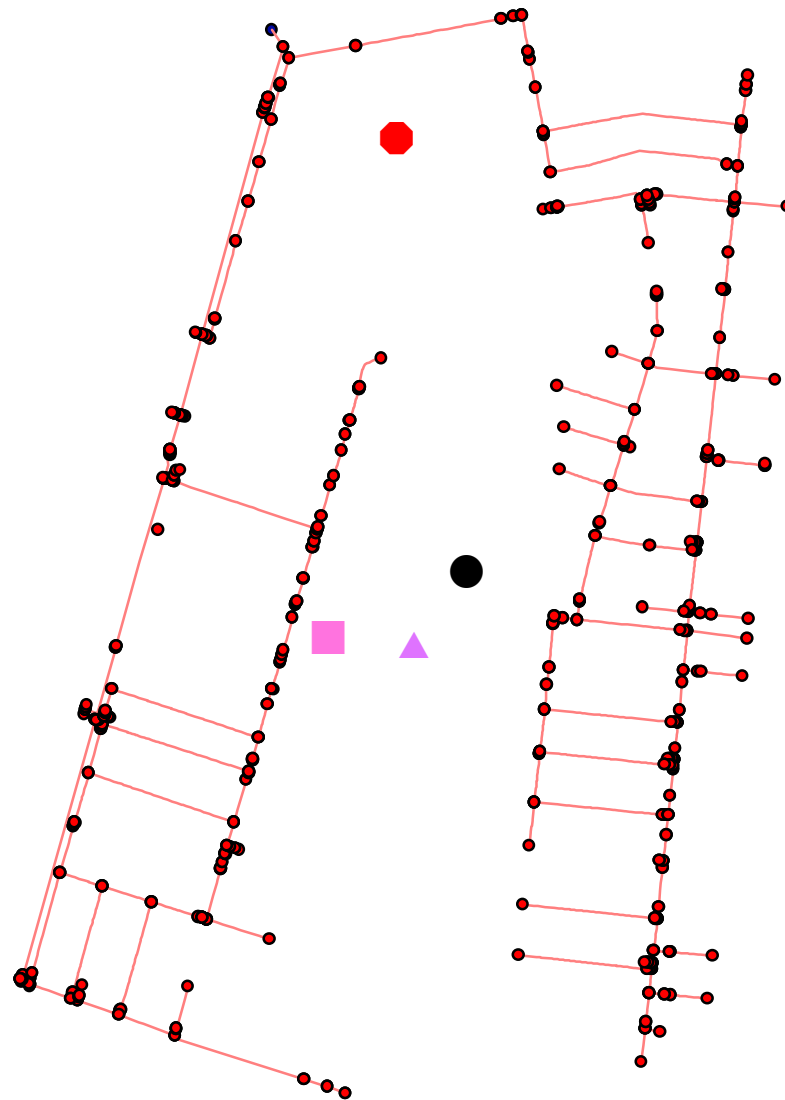
Indocadores Geométricos RDAP 1975







Leyenda

-  CPs 1975
-  CP 1975
-  CV 1975
-  CD 1975

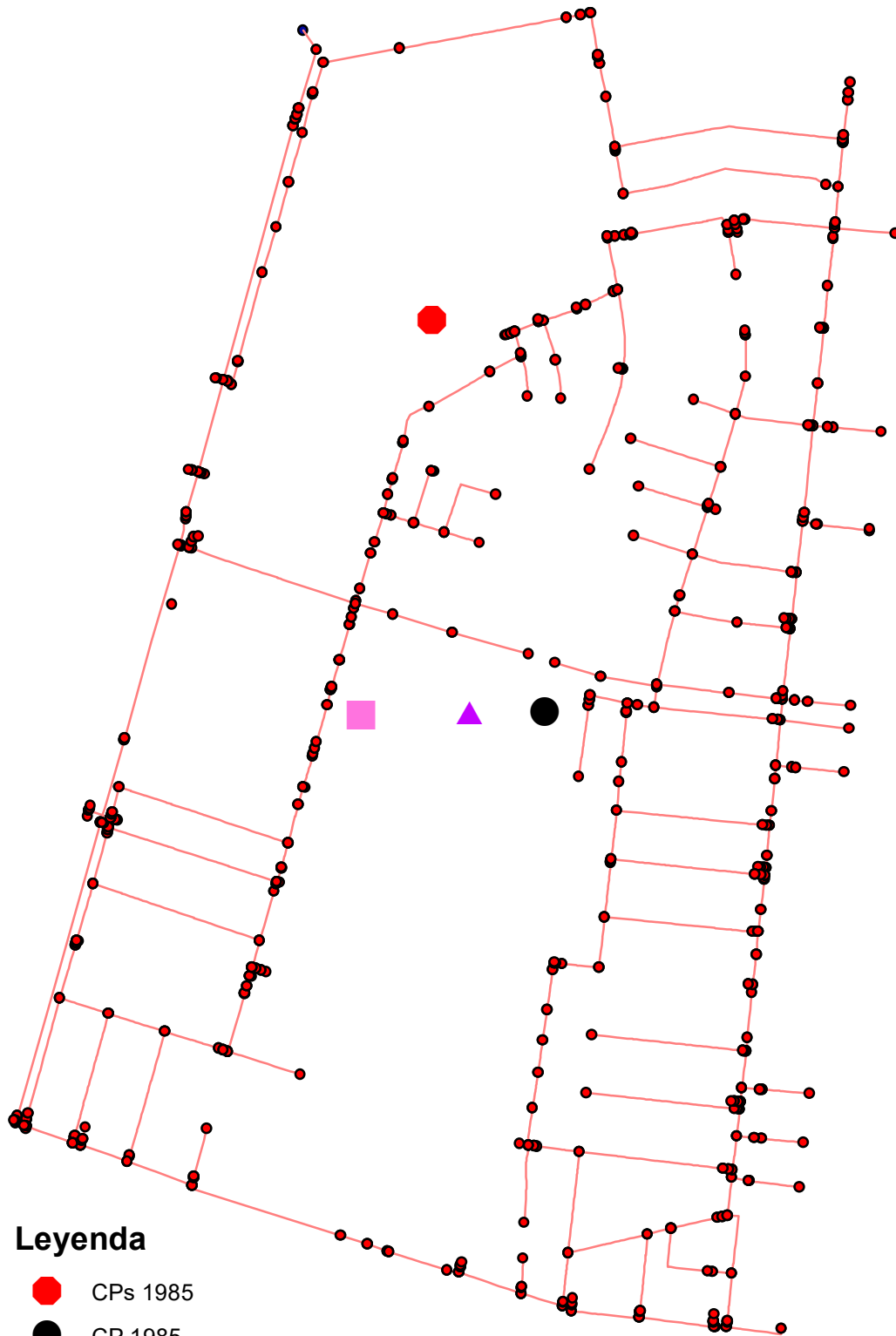
Indocadores Geométricos RDAP 1978







Leyenda

-  CPs 1978
-  CP 1978
-  CV 1978
-  CD 1978

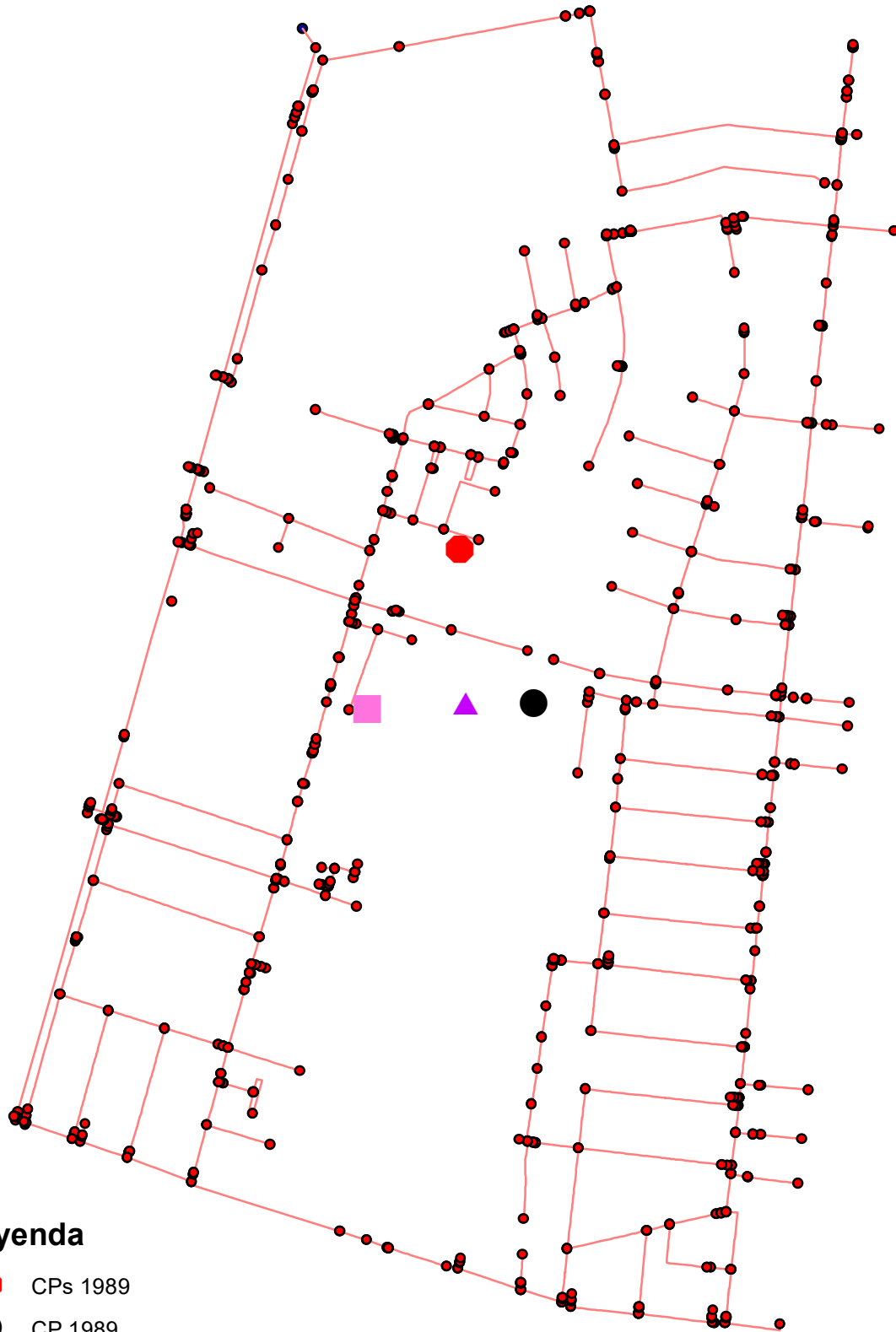
Indocadores Geométricos RDAP 1985



Leyenda

-  CPs 1985
-  CP 1985
-  CV 1985
-  CD 1985

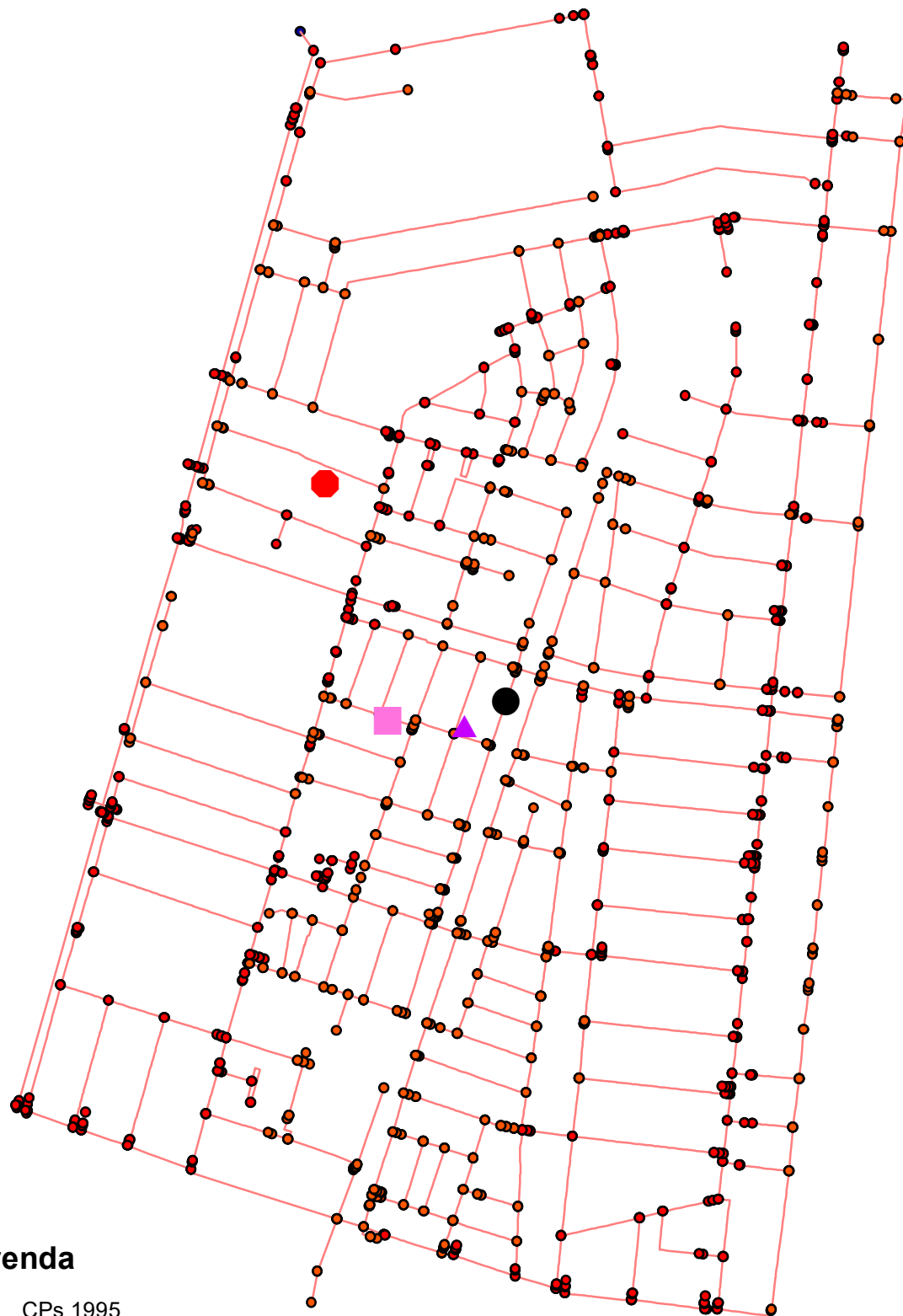
Indocadores Geométricos RDAP 1989



Leyenda

- CPs 1989
- CP 1989
- CV 1989
- ▲ CD 1989

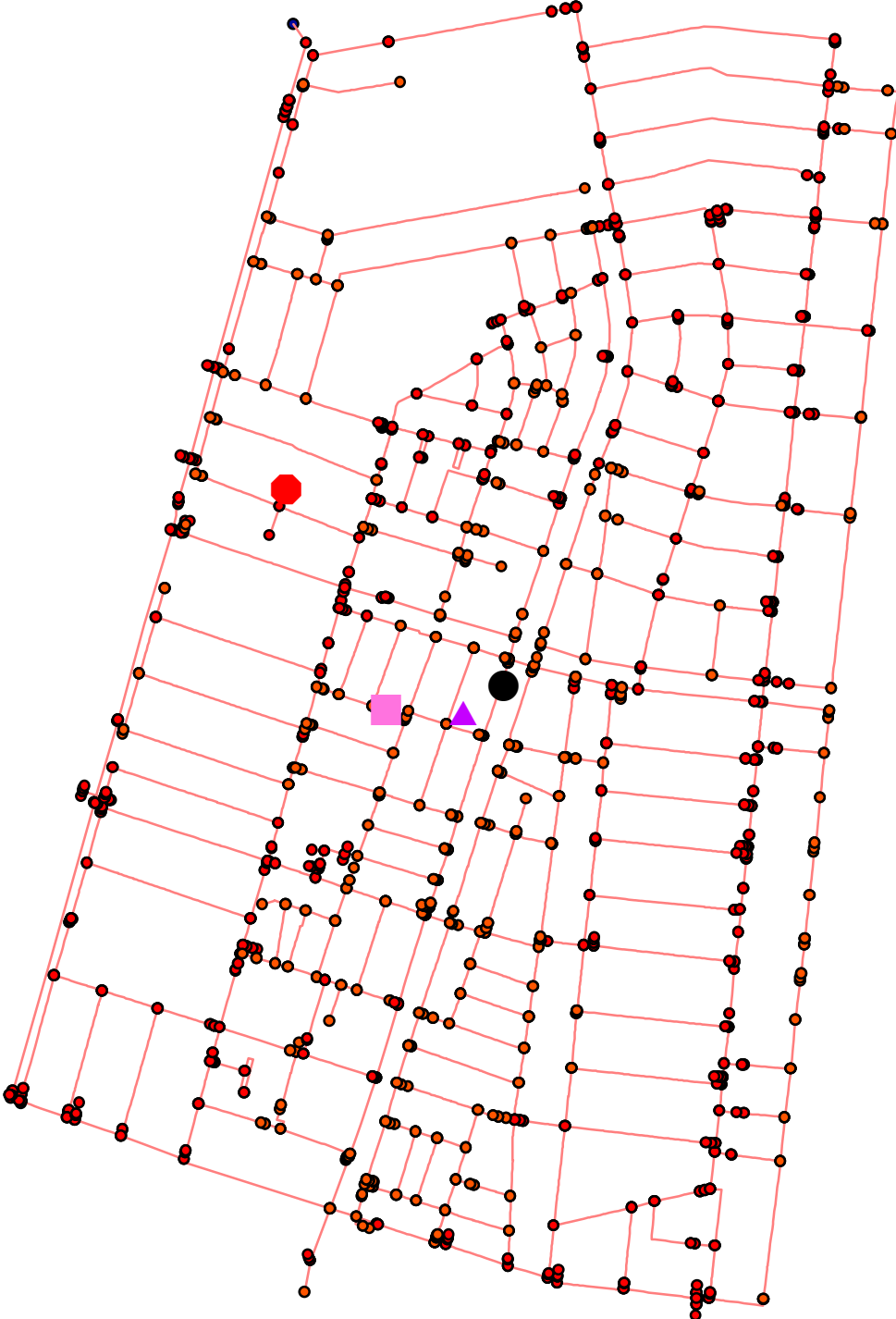
Indocadores Geométricos RDAP 1995



Leyenda

- CPs 1995
- CP 1995
- CV 1995
- ▲ CD 1995

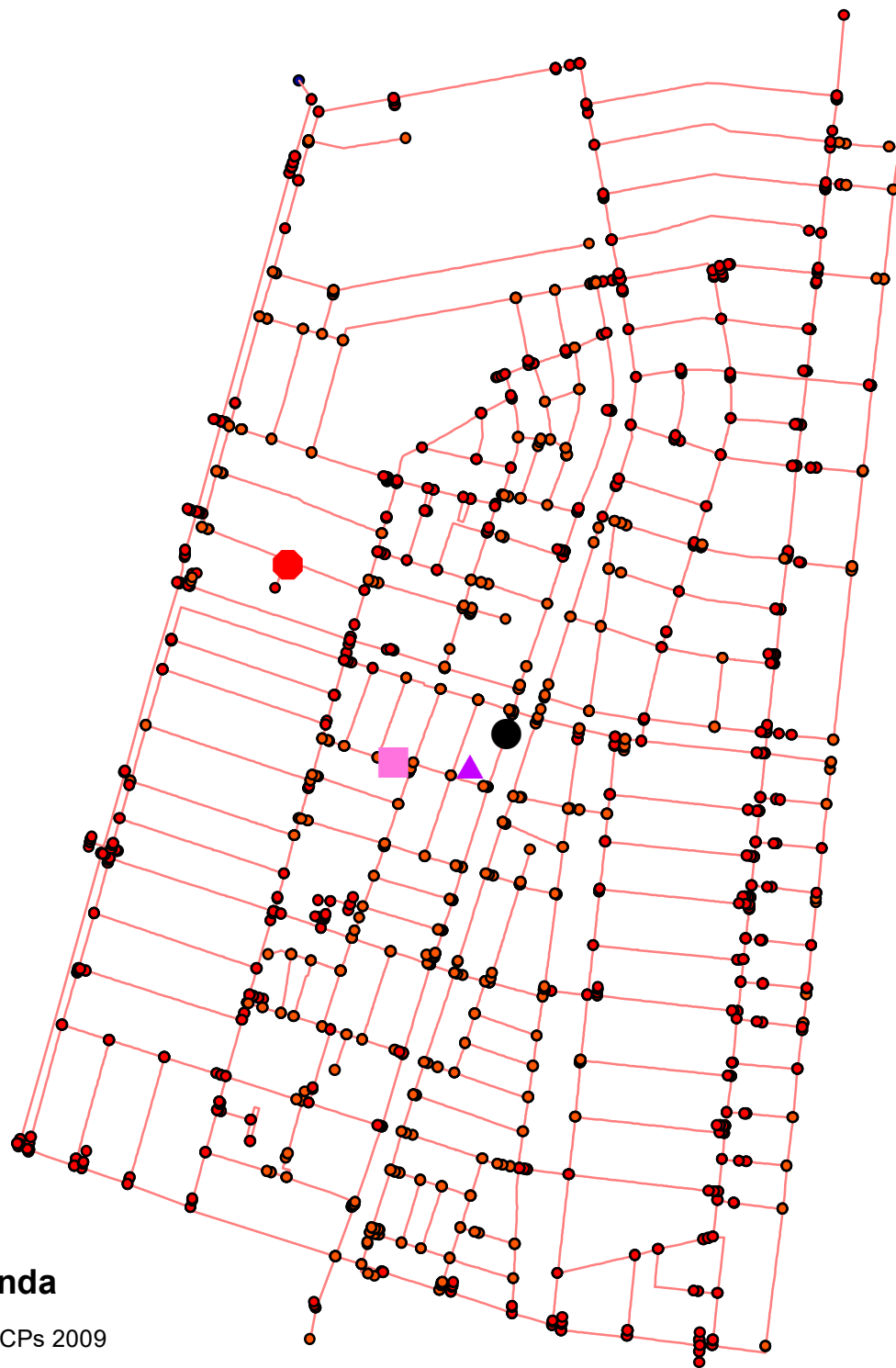
Indocadores Geométricos RDAP 1999



Leyenda

- CPs 1999
- CP 1999
- CV 1999
- ▲ CD 1999

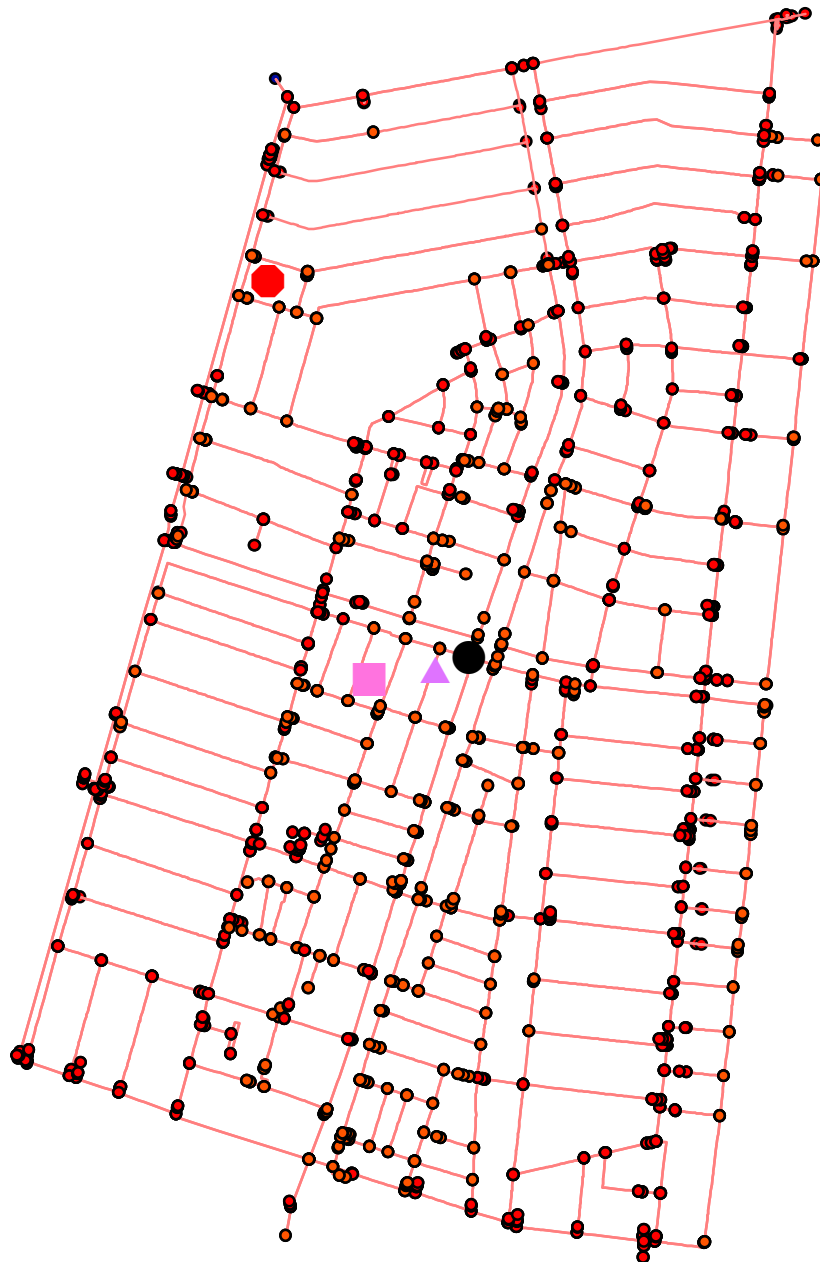
Indocadores Geométricos RDAP 2009







Leyenda

- CPs 2009
- CP 2009
- CV 2009
- ▲ CD 2009

Indicadores Geométricos RDAP 2014

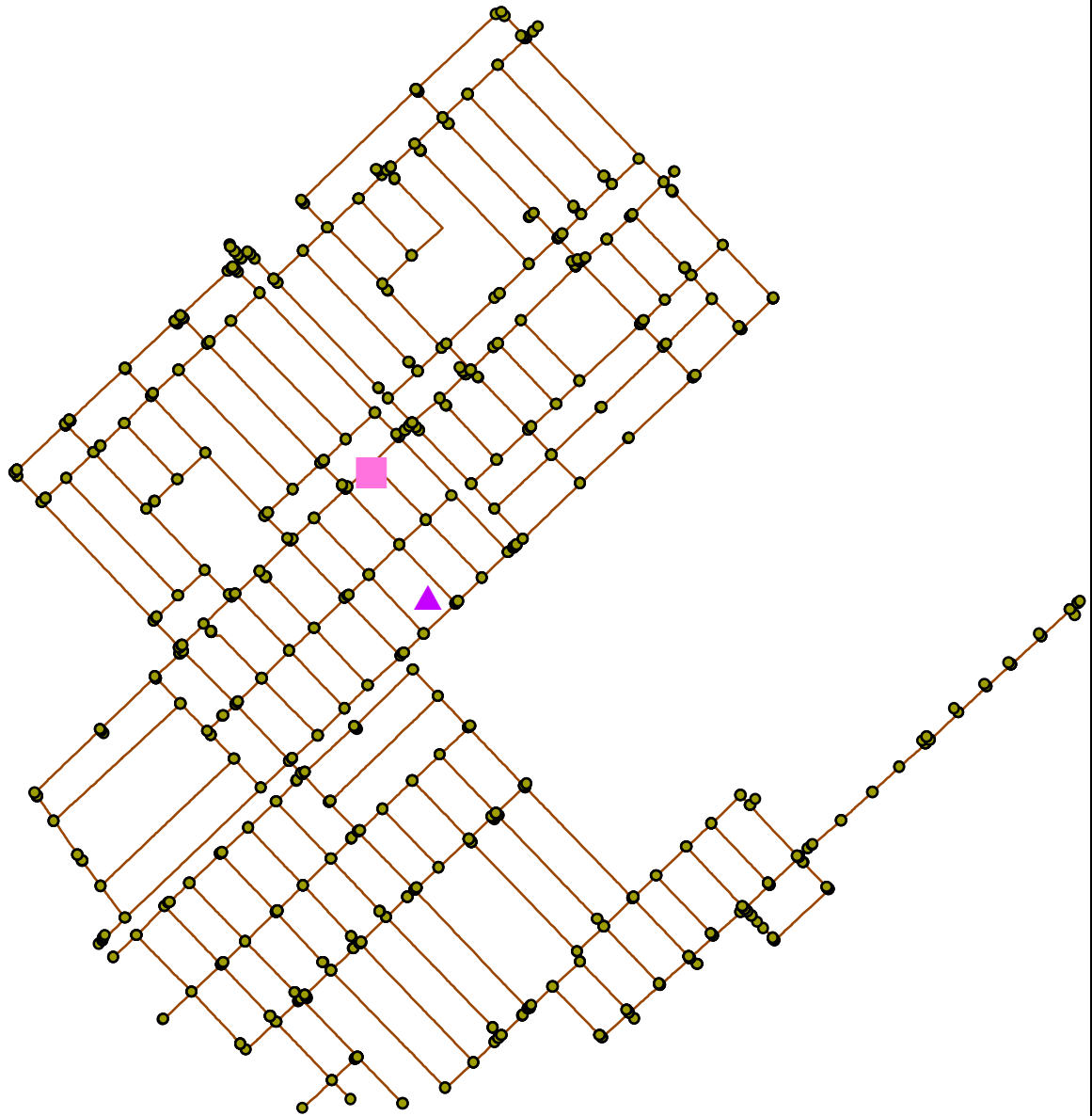


Leyenda

-  CPs 2014
-  CP 2014
-  CV 2014
-  CD 2014

RBS-22

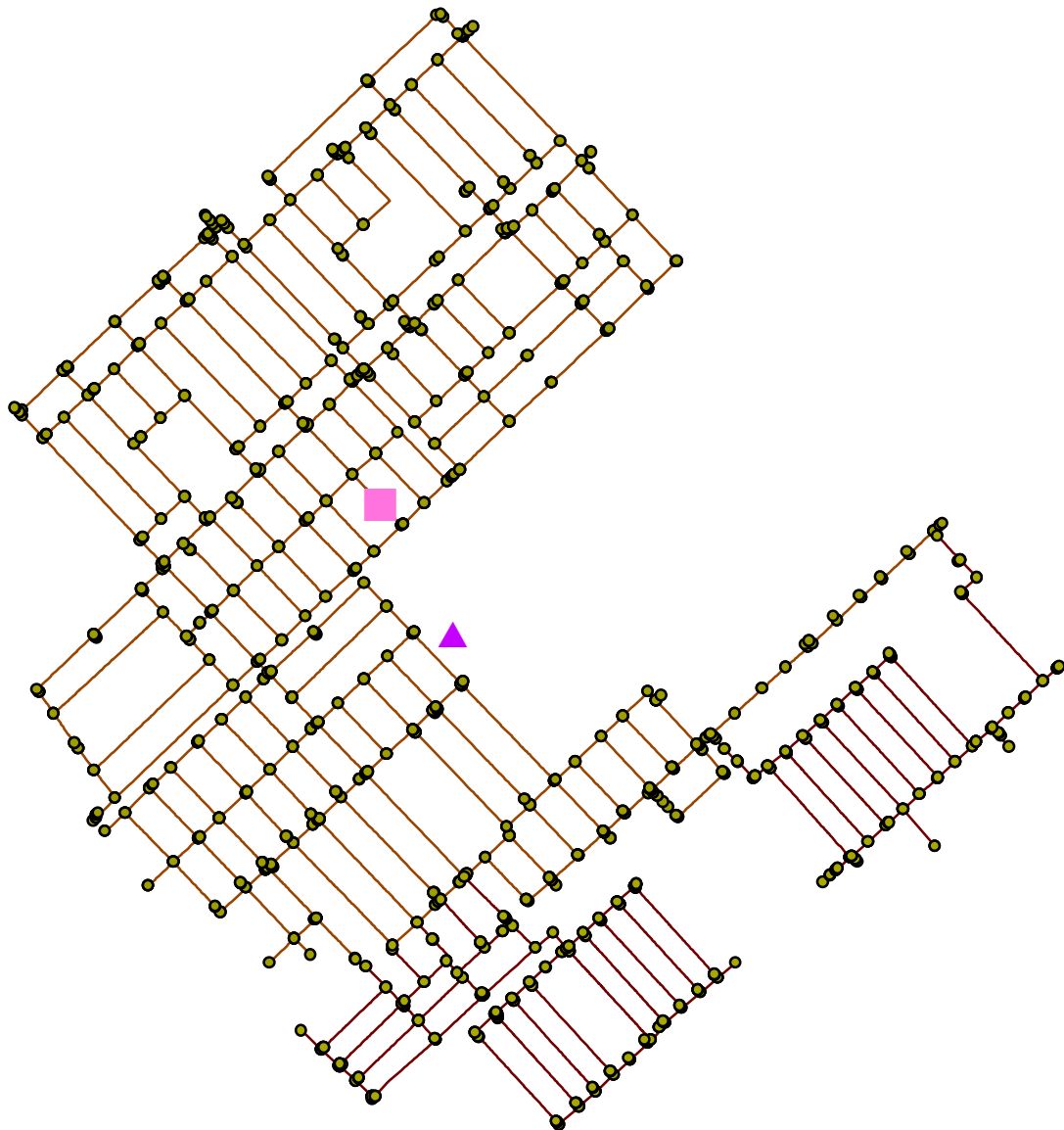
Indicadores Geométricos RDAP 1975





Leyenda

- CV 1975
- ▲ CD 1975

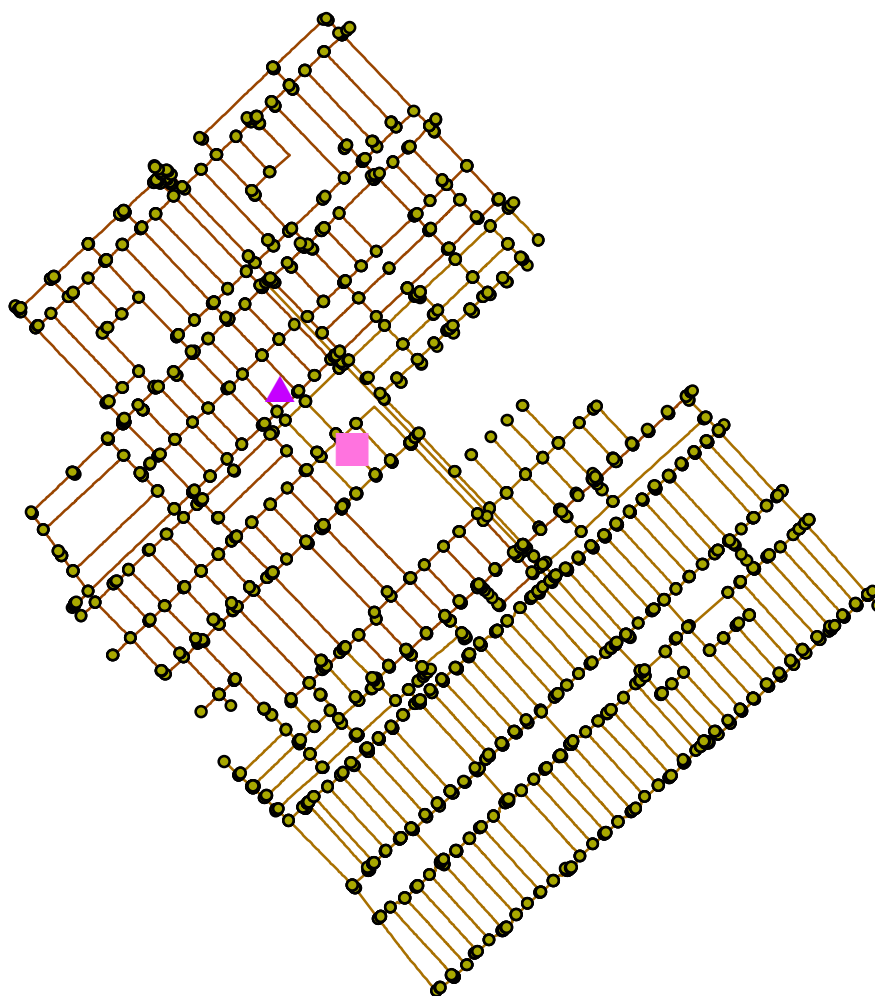
Indicadores Geométricos RDAP 1985



Leyenda

-  CV 1985
-  CD 1985

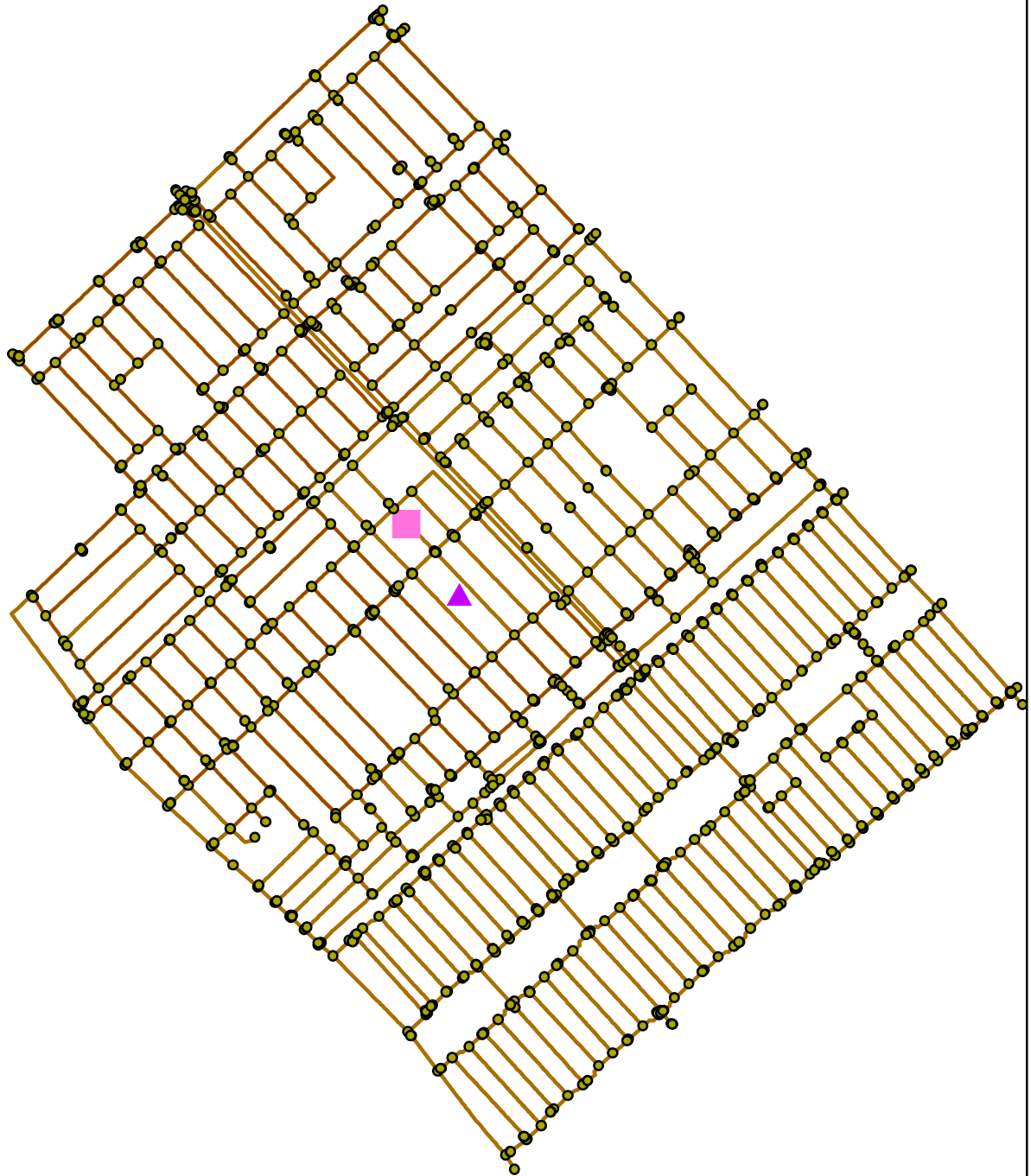
Indicadores Geométricos RDAP 1995





Leyenda

- ▲ CD 1995
- CV 1995

Indicadores Geométricos RDAP 2017

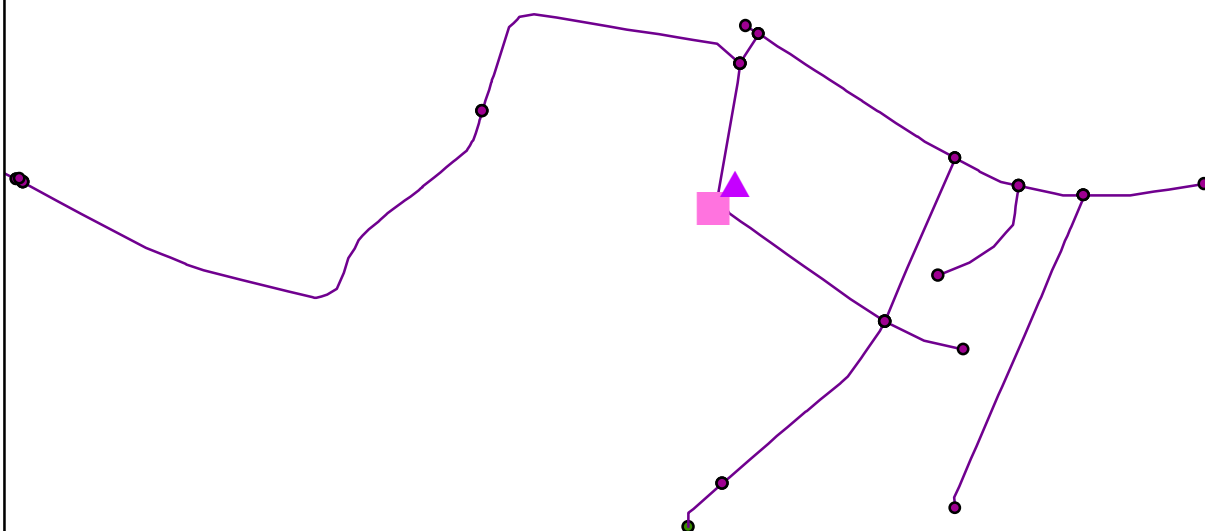


Leyenda

-  CV 2017
-  CD 2017

Bajo Rosales

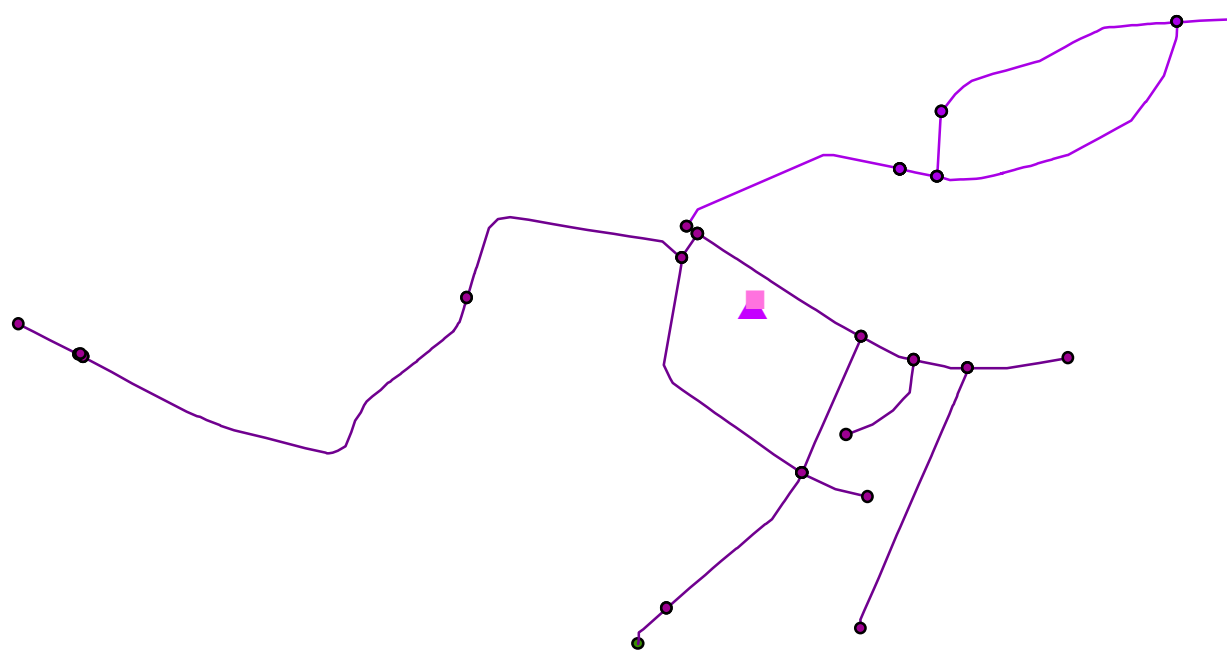
Indicadores Geométricos RDAP 1977



Leyenda

- ▲ CD 1977
- CV 1977

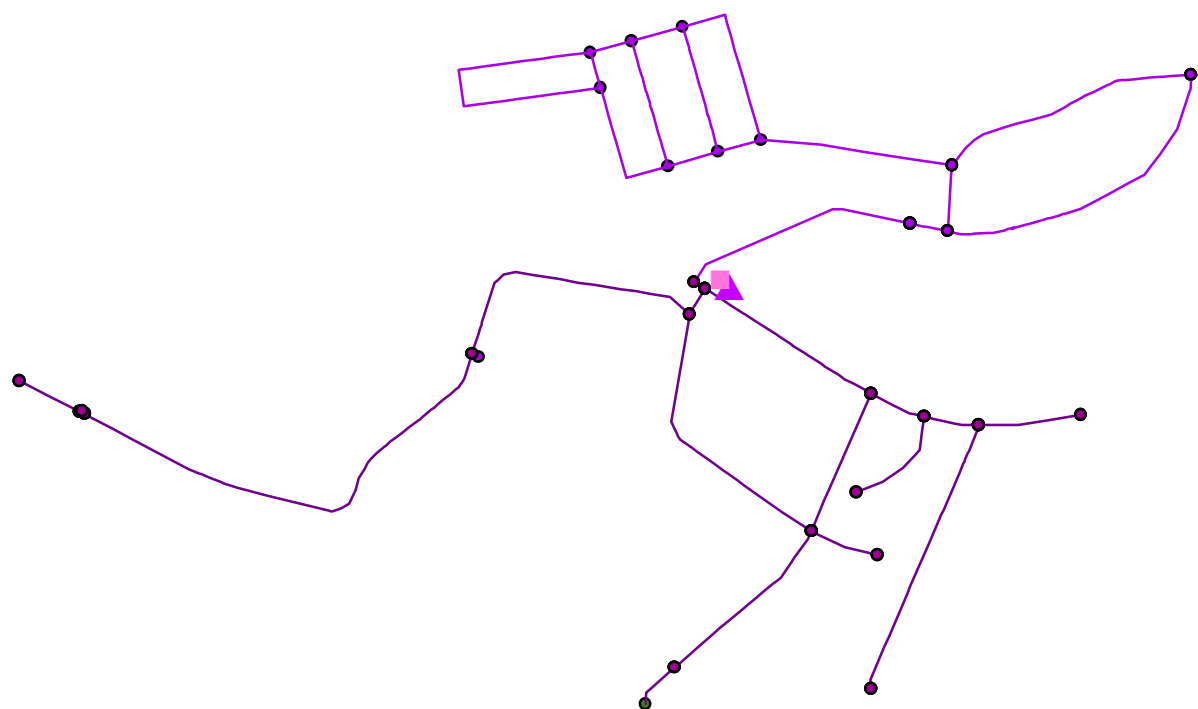
Indicadores Geométricos RDAP 1990



Leyenda

- CV 1990
- ▲ CD 1990

Indicadores Geométricos RDAP 2013



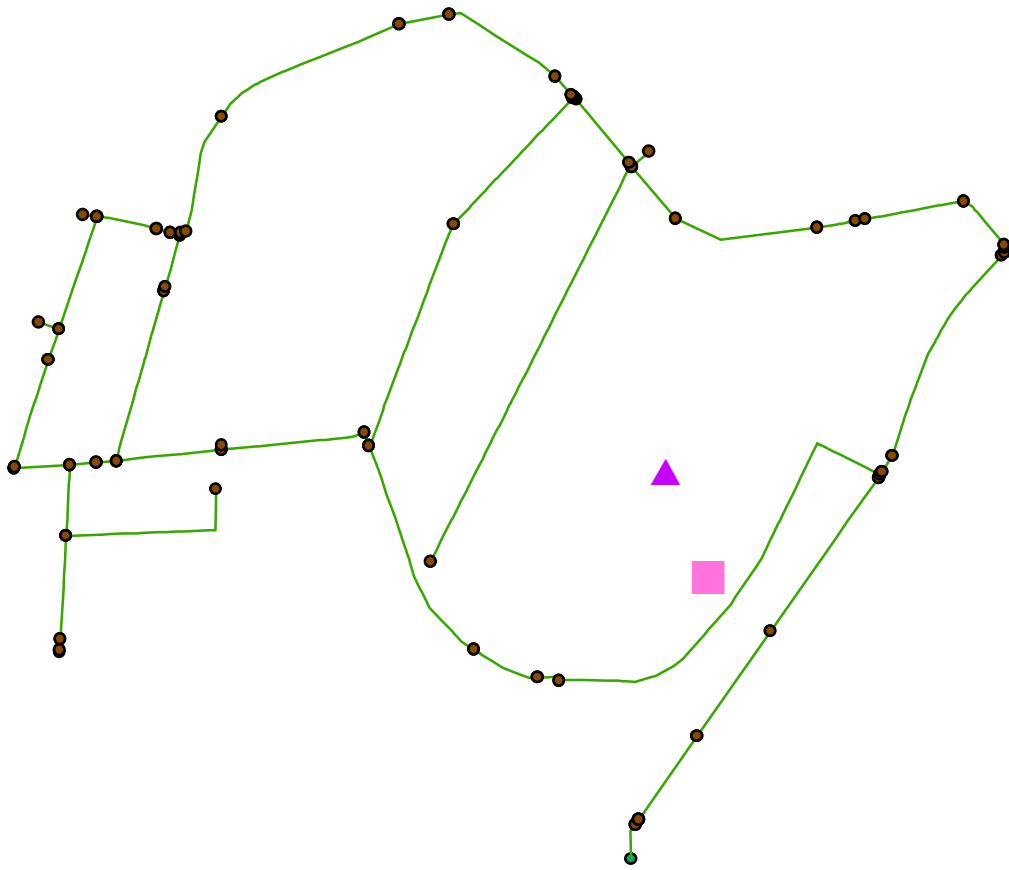
Leyenda

■ CV 2013

▲ CD 2013

Circuito 51

Indicadores Geométricos RDAP 1960

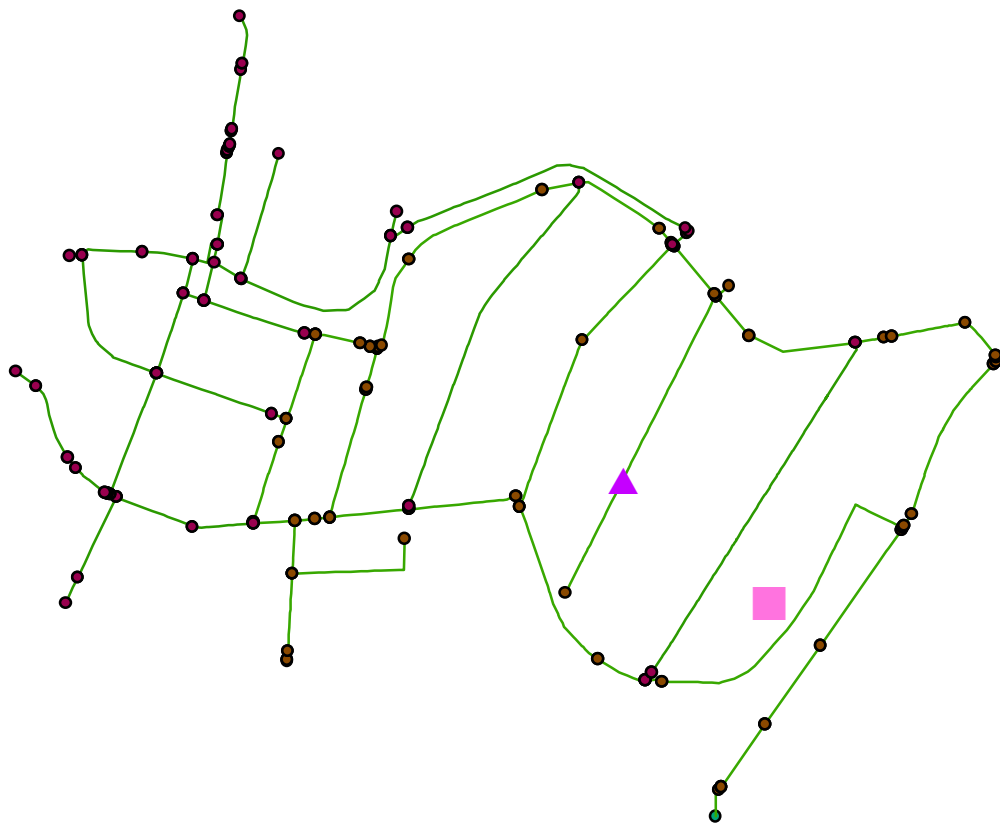


Leyenda

■ CV 1960

▲ CD 1960

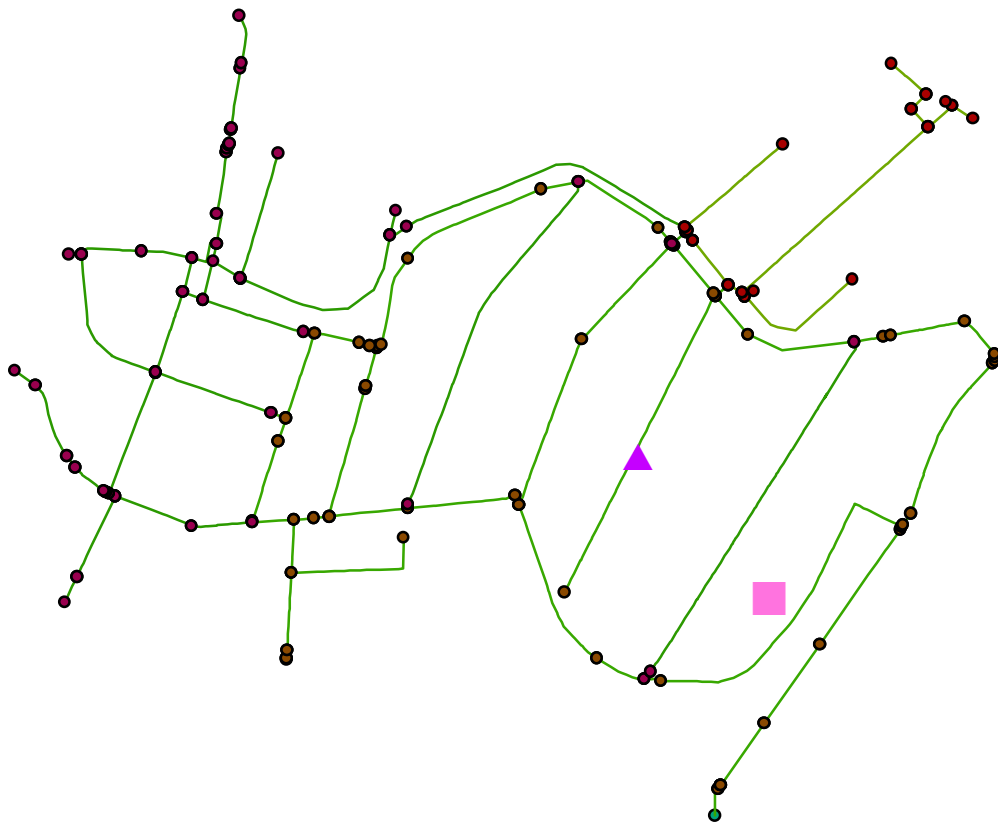
Indicadores Geométricos RDAP 1978





Leyenda

- CV 1978
- ▲ CD 1978

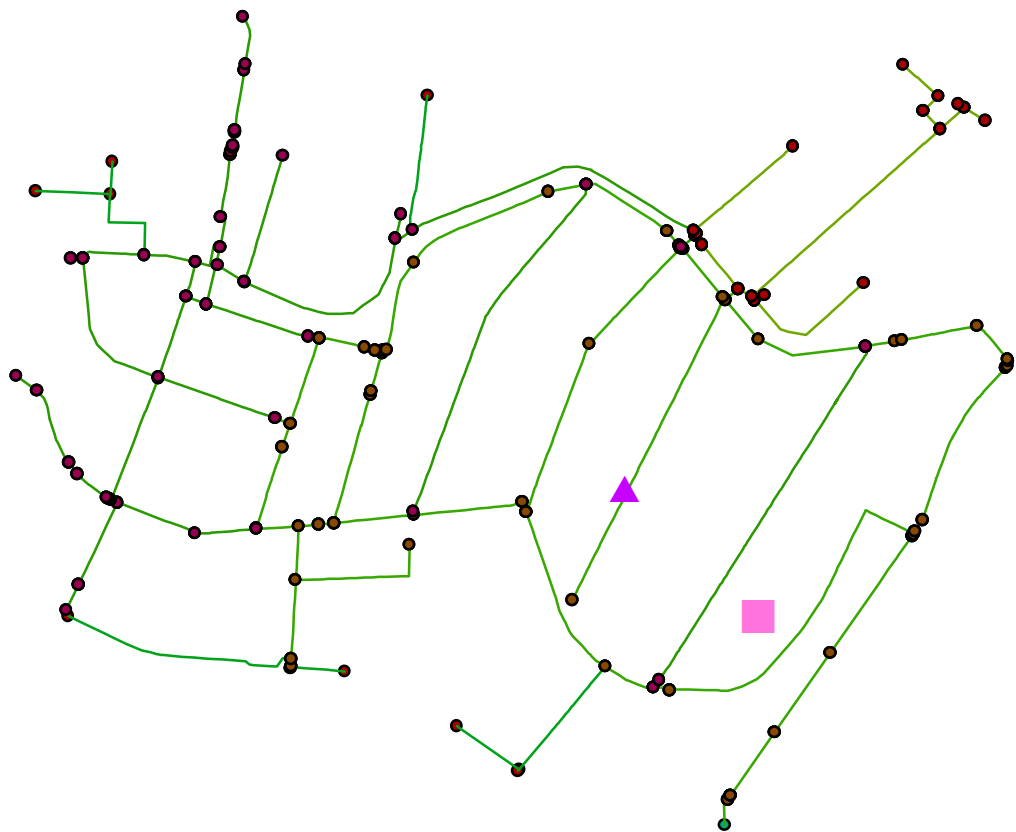
Indicadores Geométricos RDAP 1980





Leyenda

-  CV 1980
-  CD 1980

Indicadores Geométricos RDAP 2005

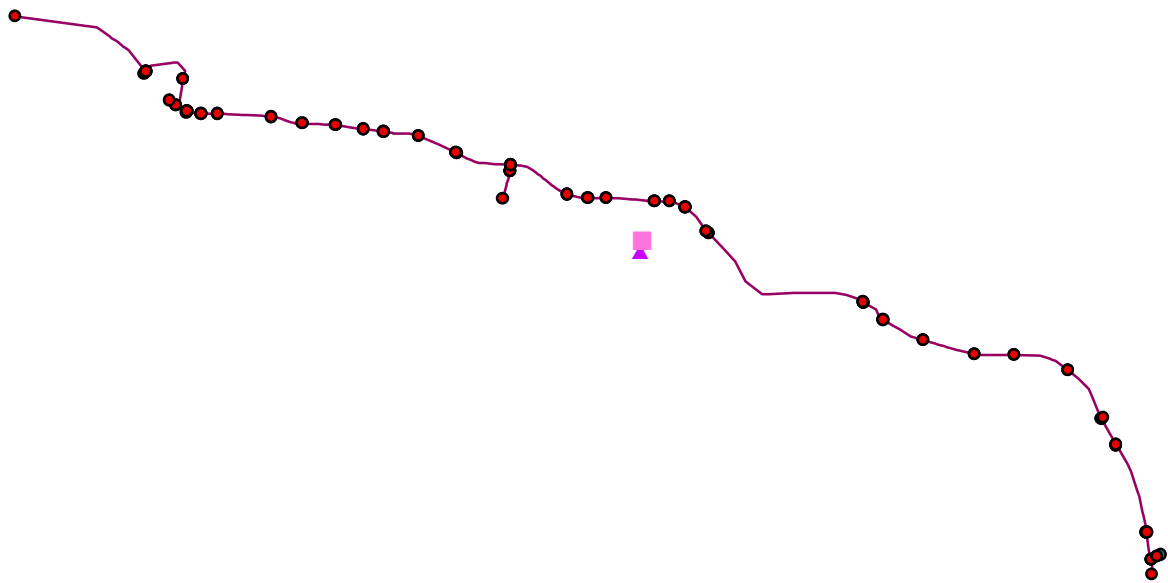


Leyenda

-  CV 2005
-  CD 2005

Derivación Cond. El cable- Fu

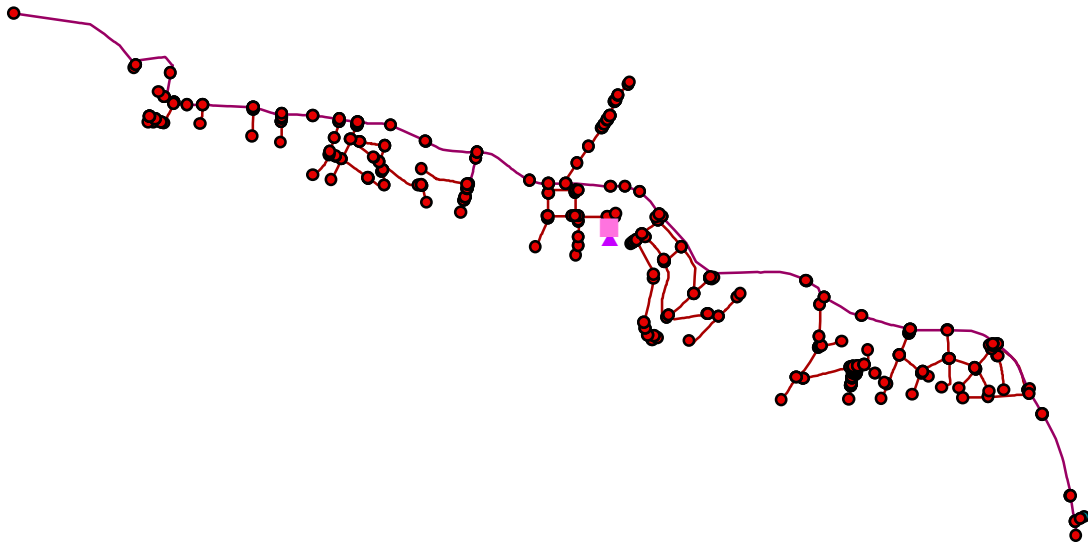
Indicadores Geométricos RDAP 1940



Leyenda

- CV 1940
- ▲ CD 1940

Indicadores Geométricos RDAP 1960



Leyenda

- CV 1960
- ▲ CD 1960

Indicadores Geométricos RDAP 1978



Leyenda

- CV 1978
- ▲ CD 1978

Indicadores Geométricos RDAP 1998



Leyenda

- CV 1998
- ▲ CD 1998

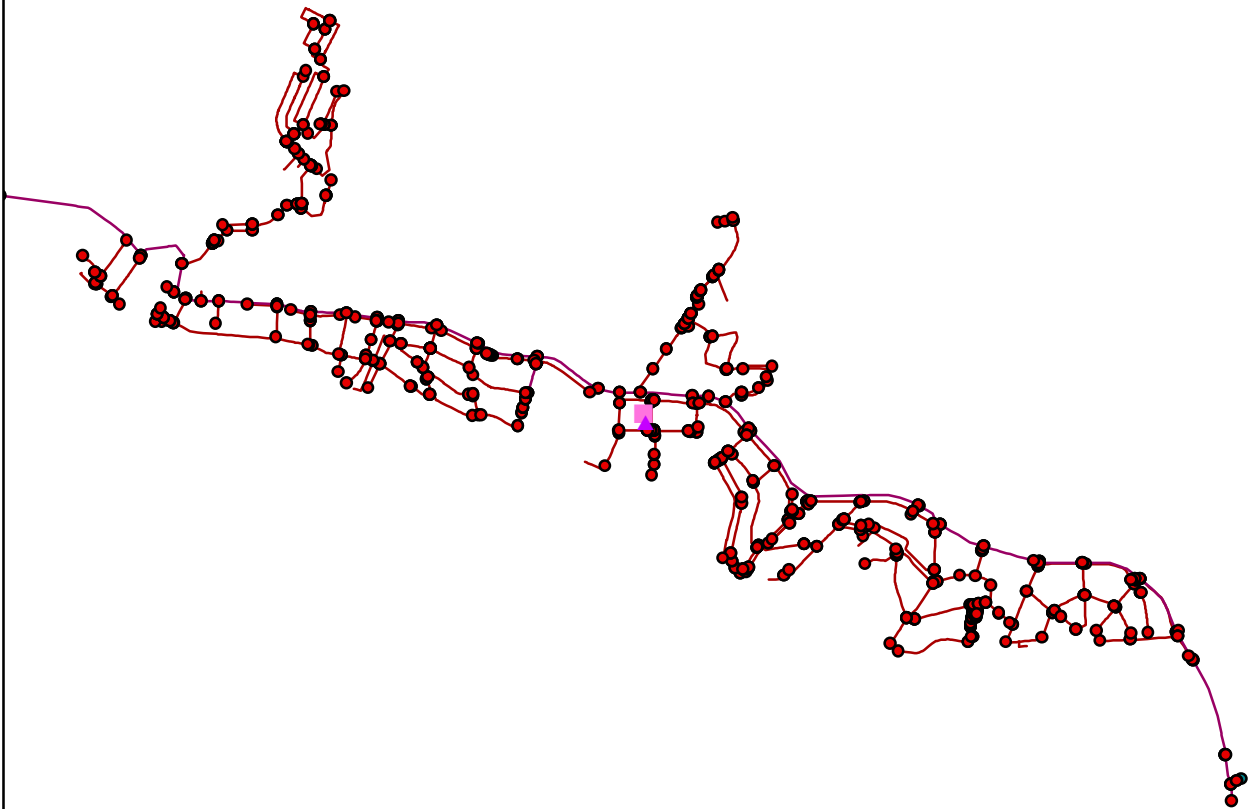
Indicadores Geométricos RDAP 2005



Leyenda

- CV 2005
- ▲ CD 2005

Indicadores Geométricos RDAP 2015

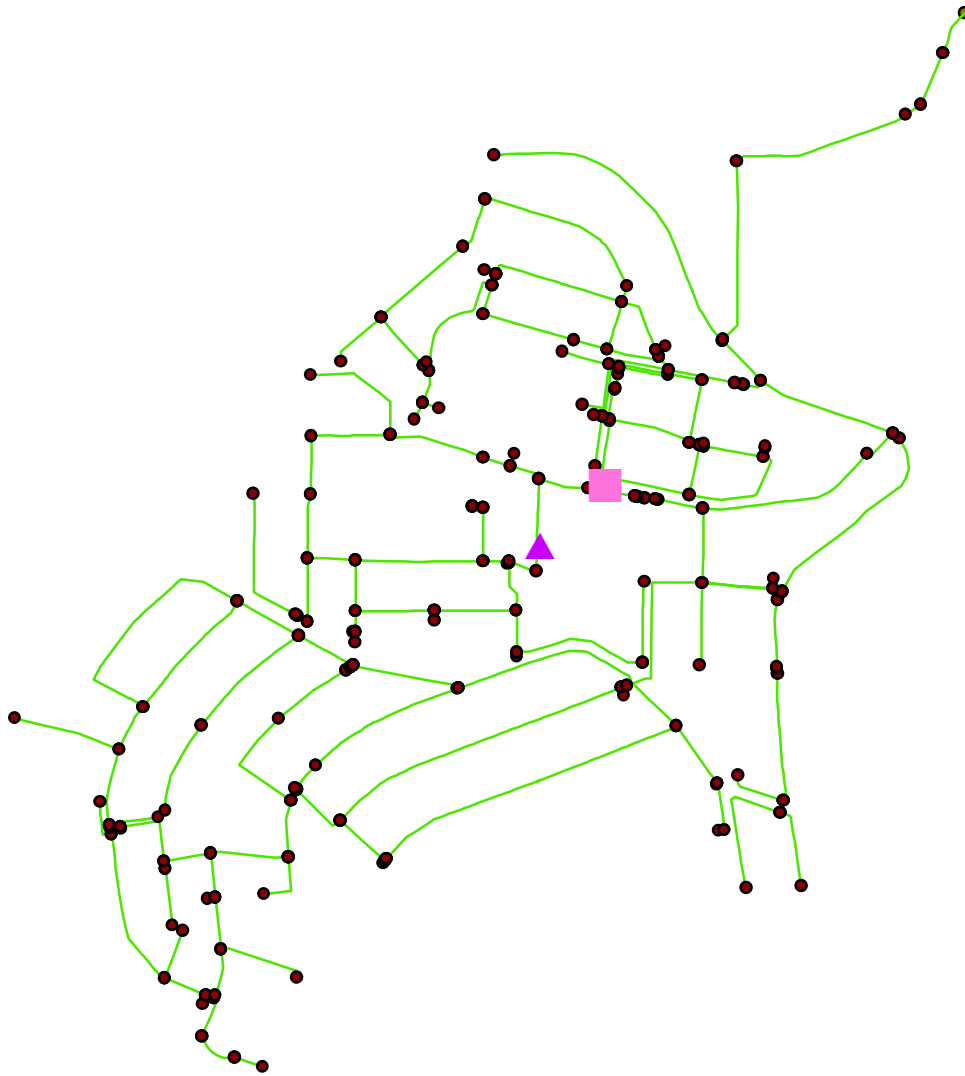


Leyenda

- ▲ CD 2015
- CV 2015

El Cable Salida de 8

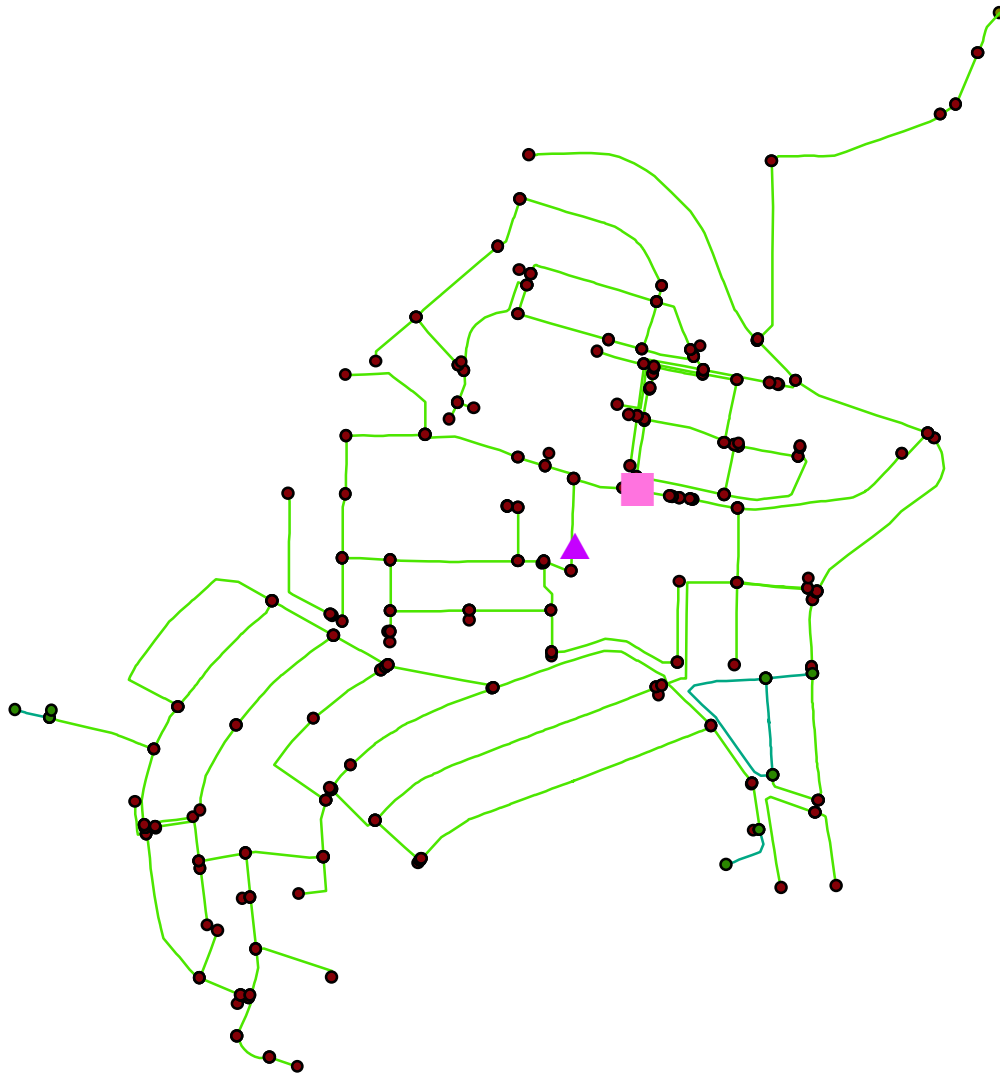
Indicadores Geométricos RDAP 1979



Leyenda

- CV 1979
- ▲ CD 1979

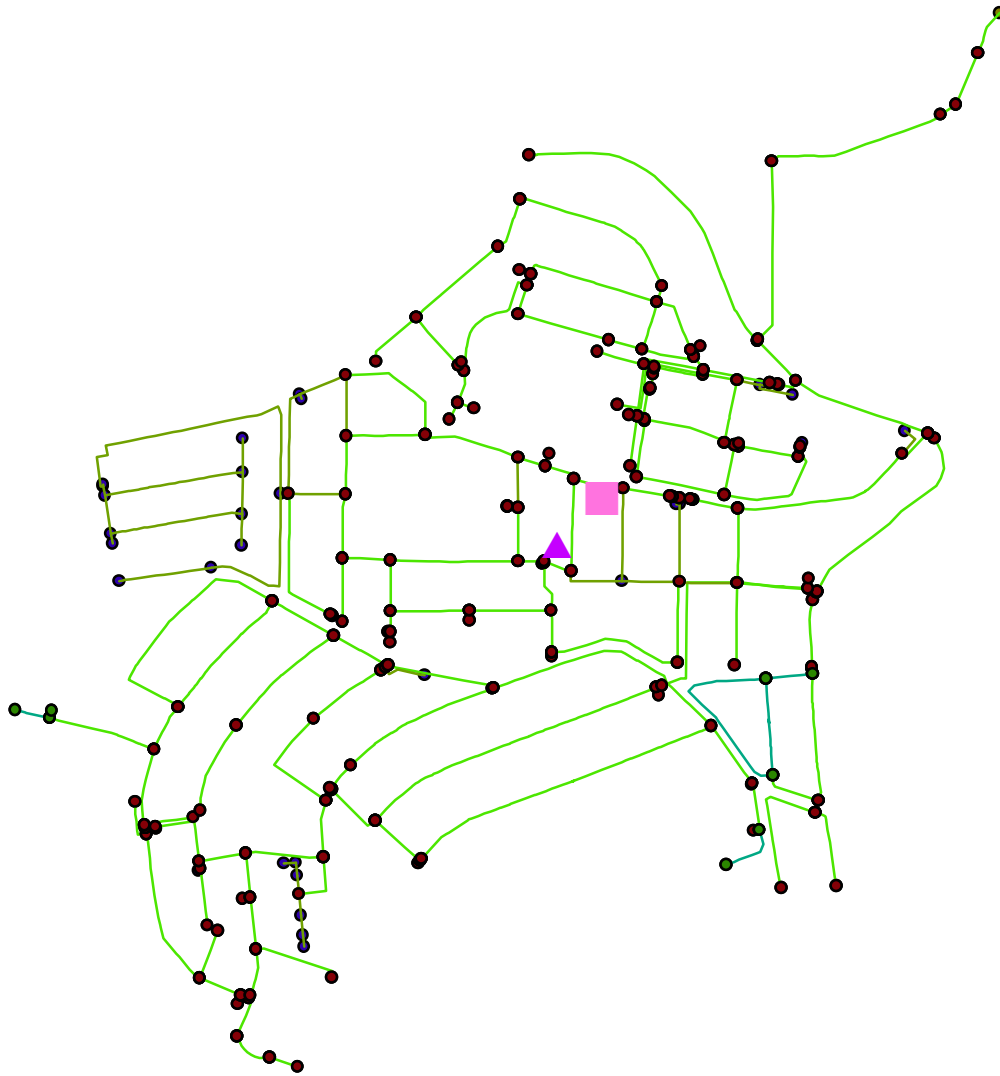
Indicadores Geométricos RDAP 1989



Leyenda

- CV 1989
- ▲ CD 1989

Indicadores Geométricos RDAP 2015

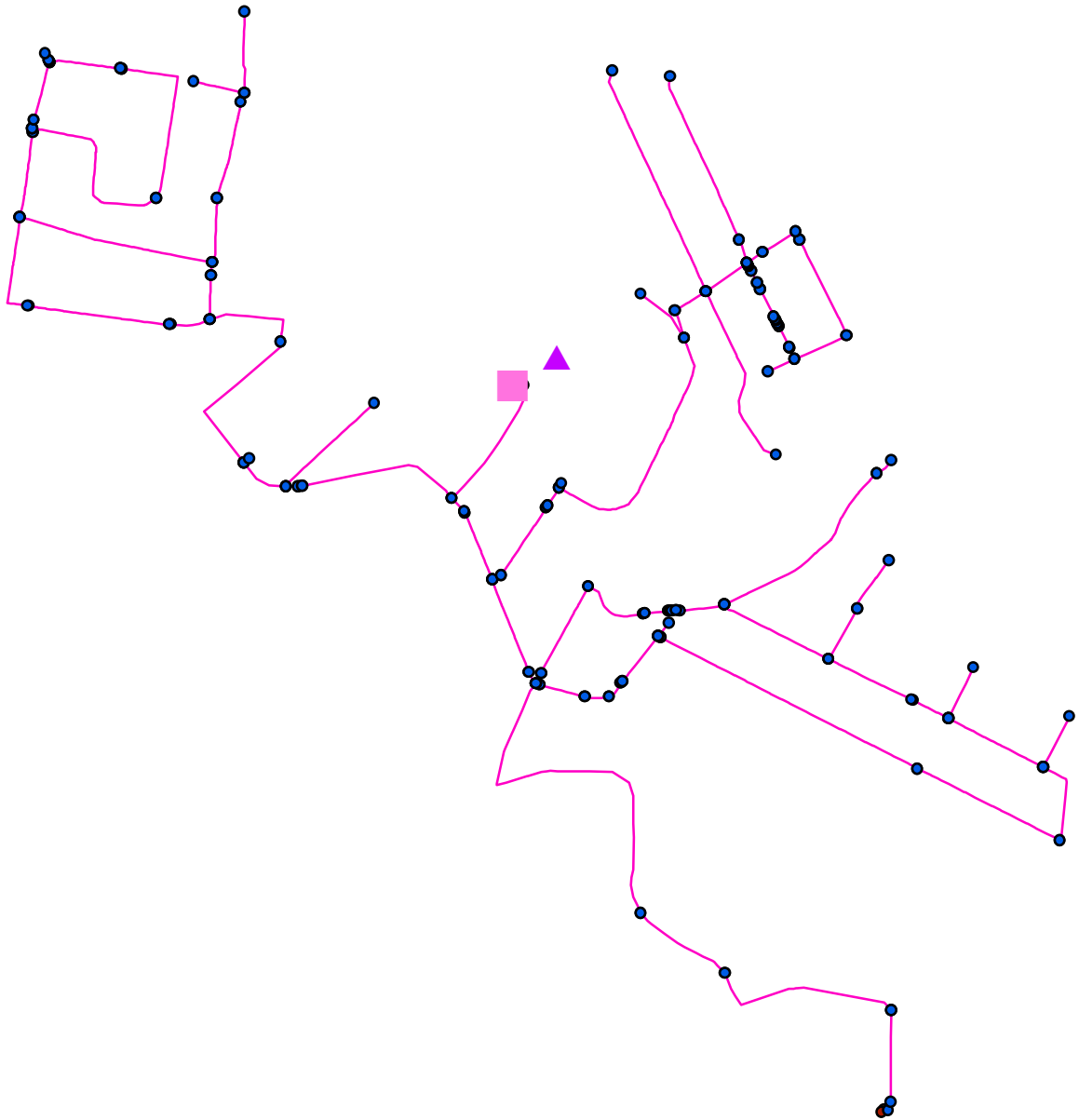


Leyenda

- CV 2015
- ▲ CD 2015

T9-Belen

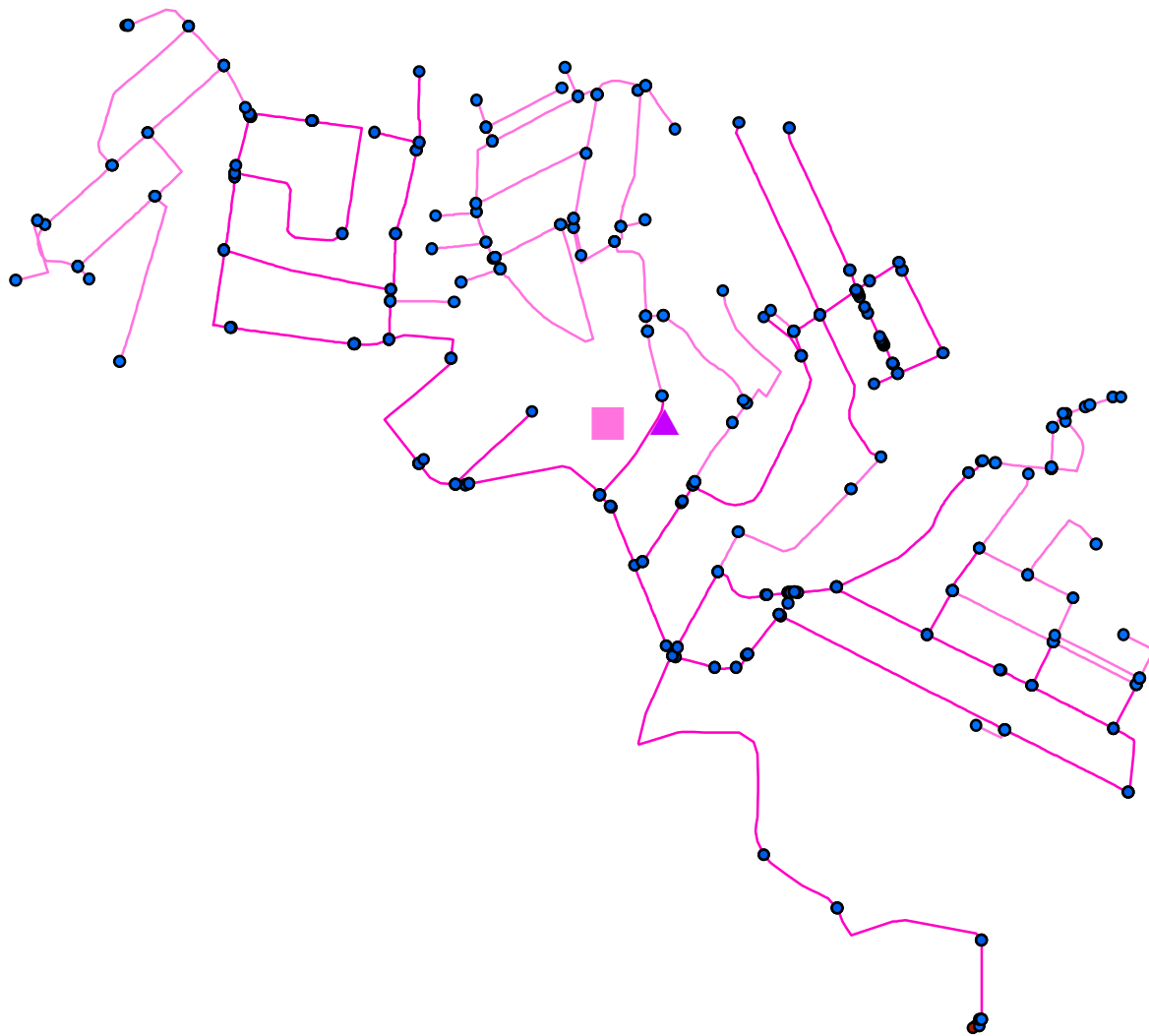
Indicadores Geométricos RDAP 1961



Leyenda

- CV 1961
- ▲ CD 1961

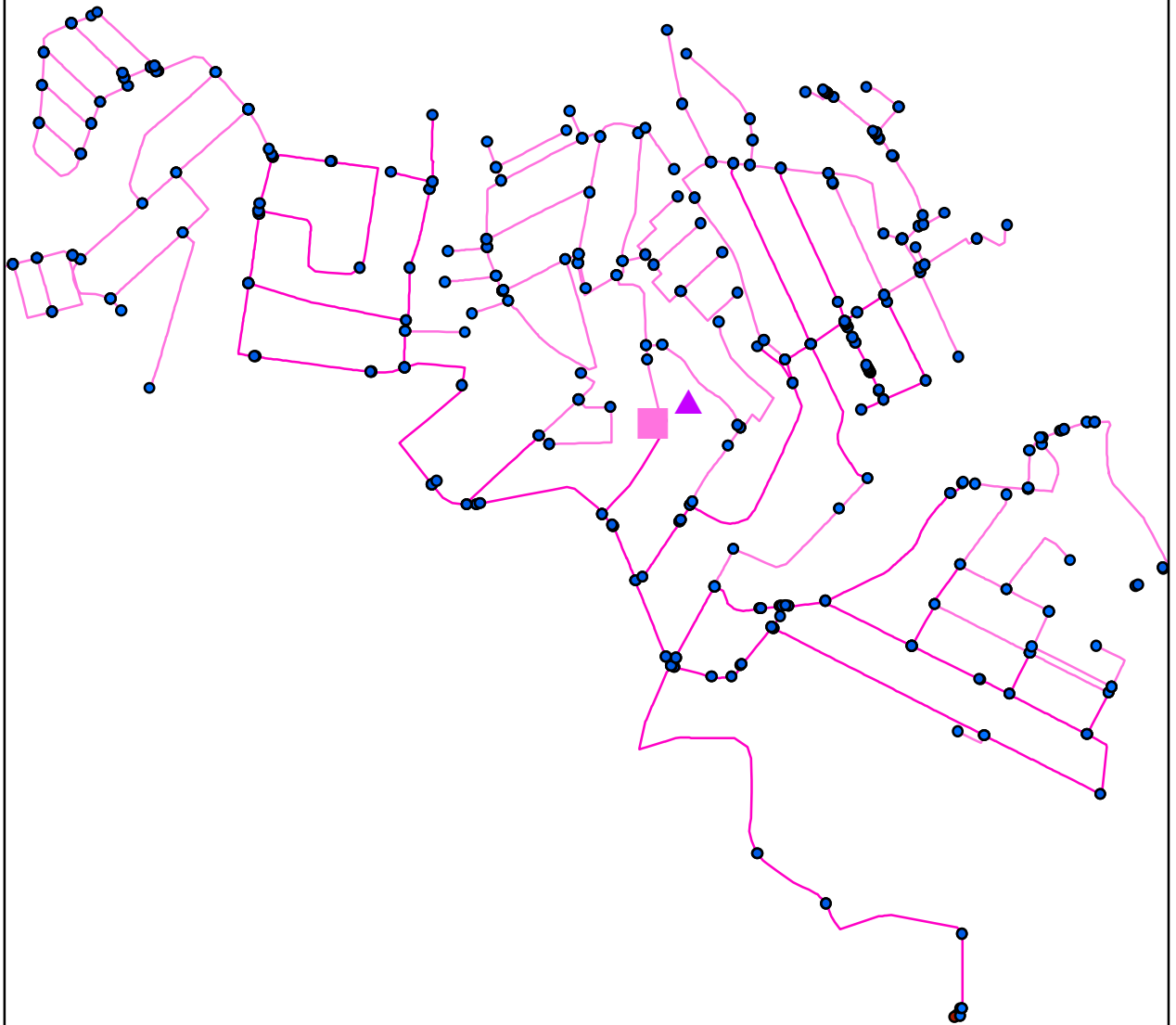
Indicadores Geométricos RDAP 1979



Leyenda

- CV 1979
- ▲ CD 1979

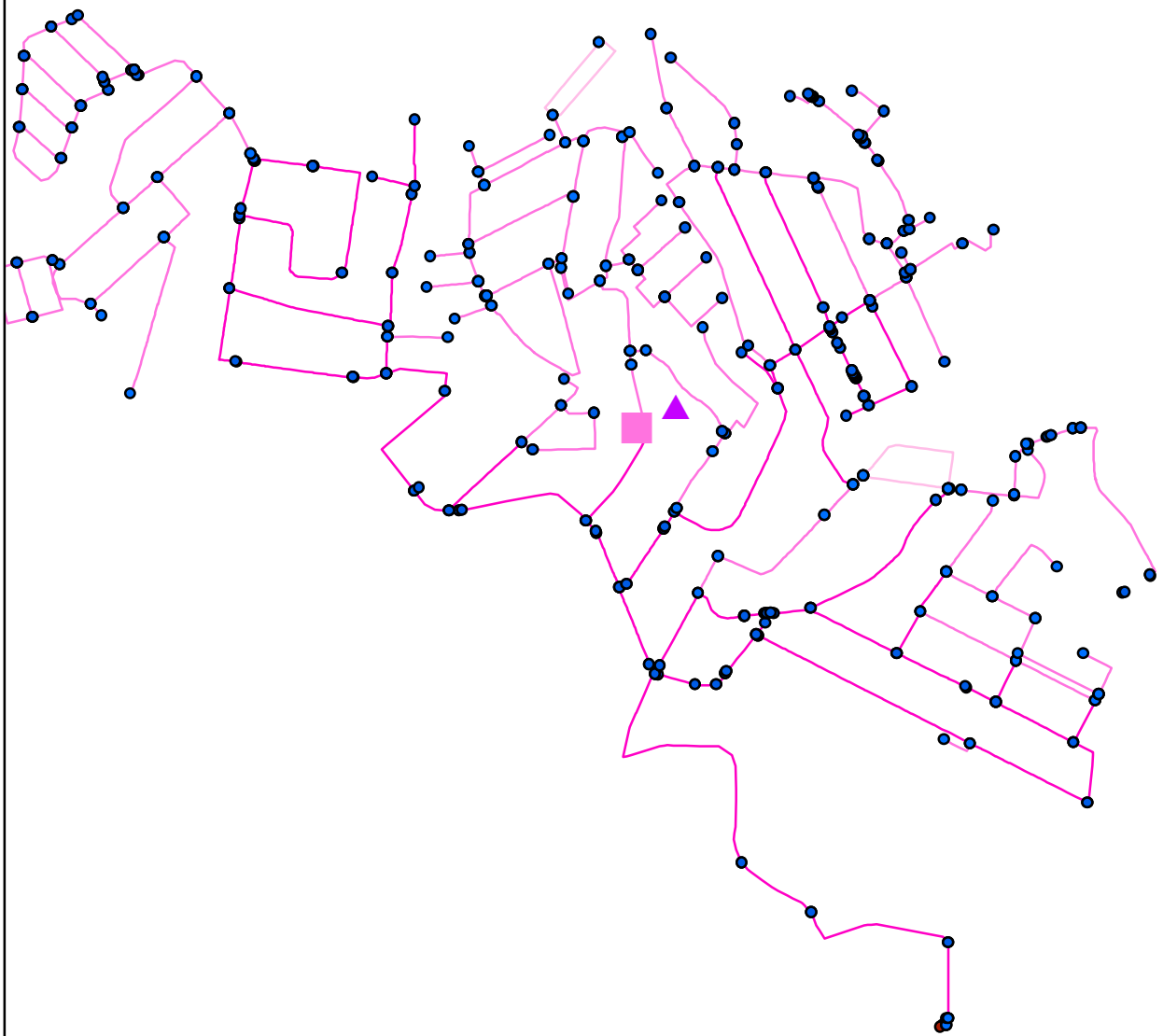
Indicadores Geométricos RDAP 1987



Leyenda

- CV 1987
- ▲ CD 1987

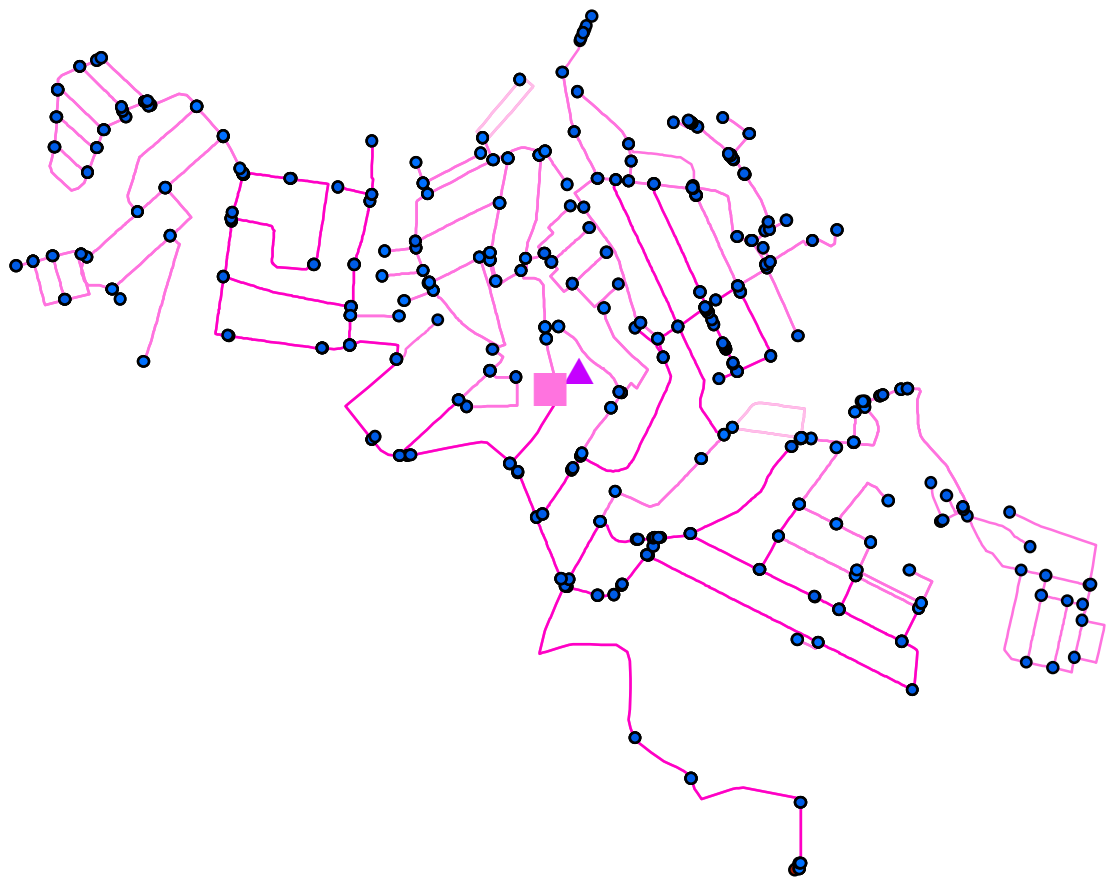
Indicadores Geométricos RDAP 1999



Leyenda

- CV 1999
- ▲ CD 1999

Indicadores Geométricos RDAP 2014

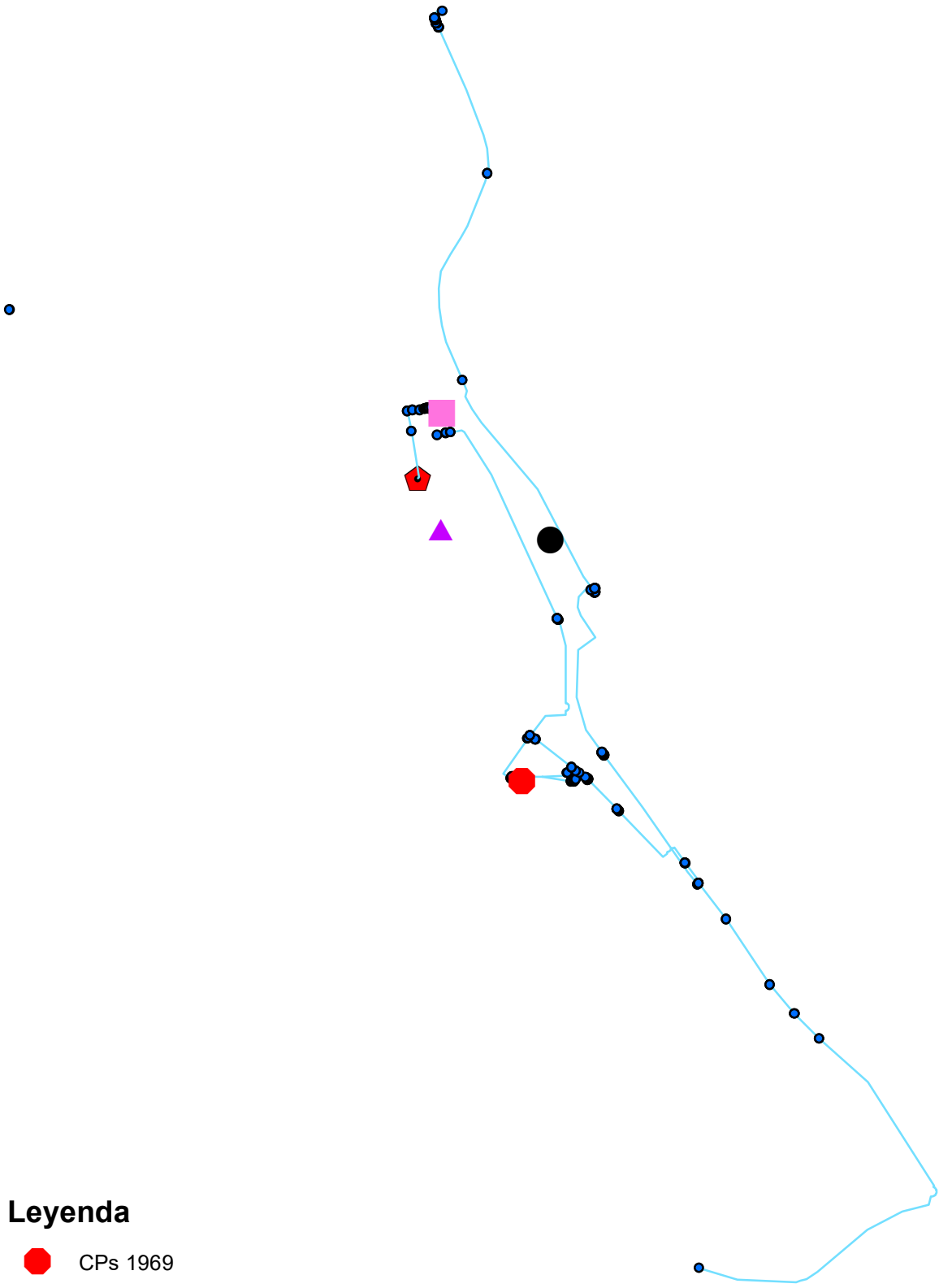


Leyenda

- CV 2014
- ▲ CD 2014

Las Lomas

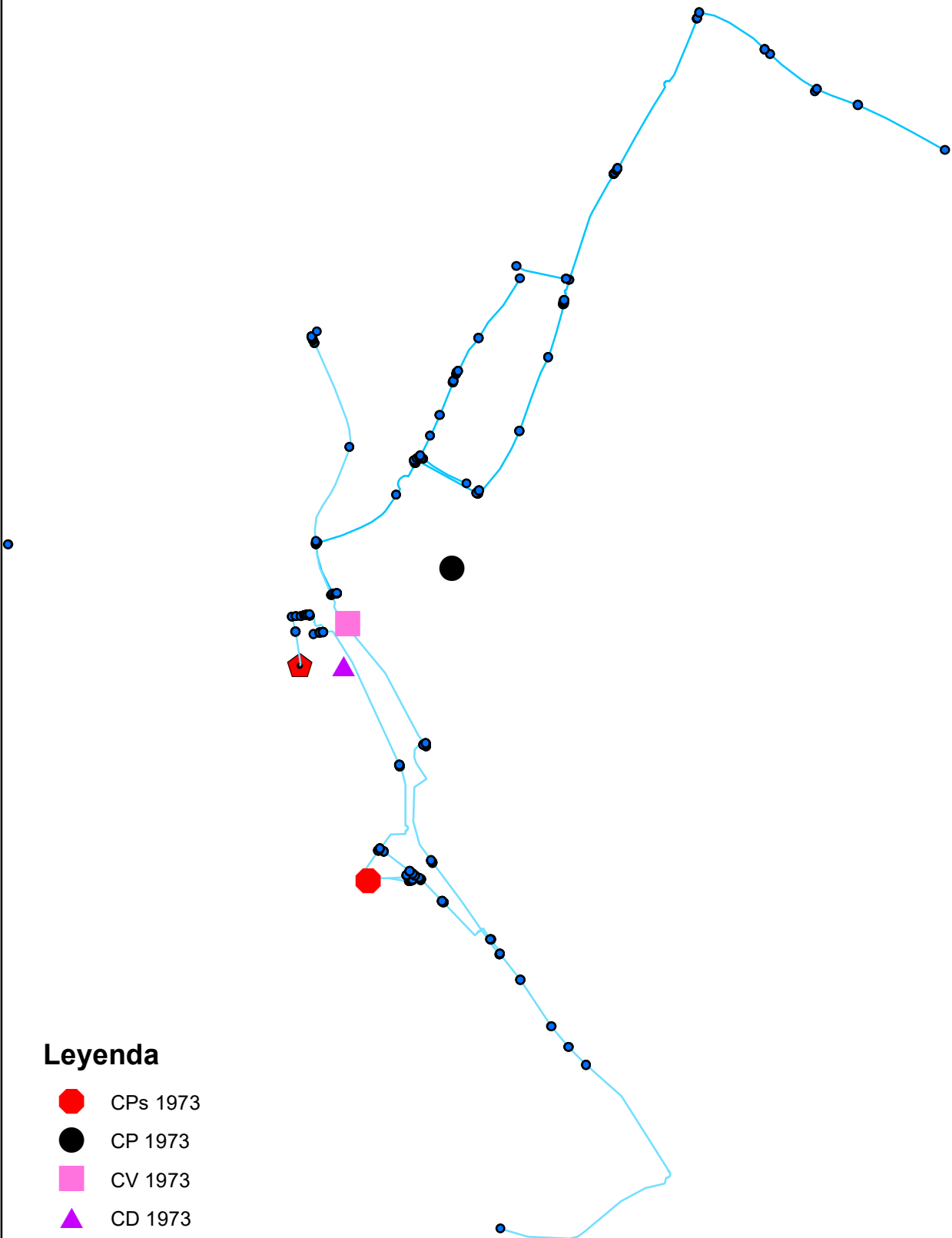
Indicadores Geométricos RDAP 1969



Leyenda

- CPs 1969
- CP 1969
- CV 1969
- ▲ CD 1969

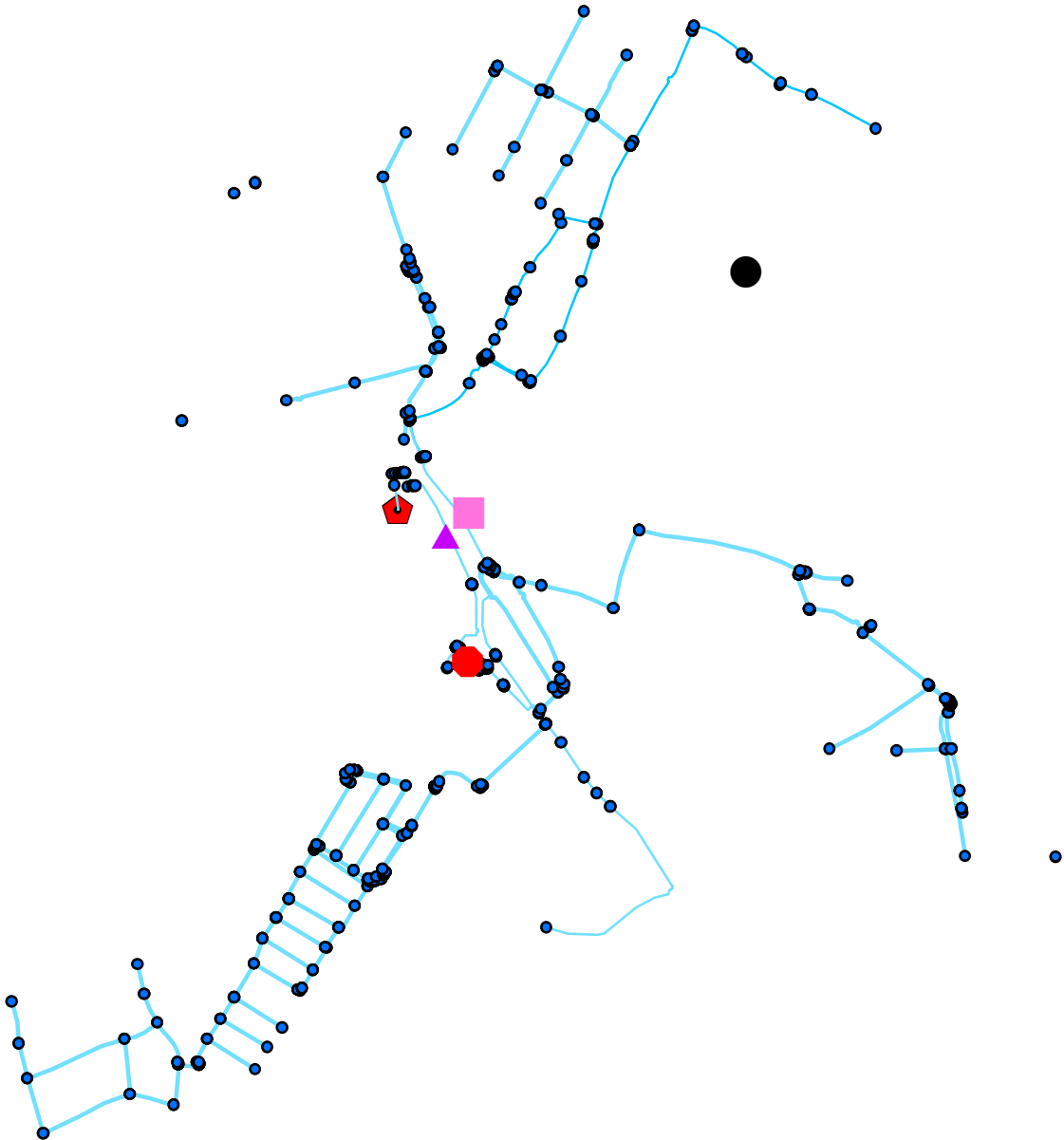
Indicadores Geométricos RDAP 1973



Leyenda

- CPs 1973
- CP 1973
- CV 1973
- ▲ CD 1973

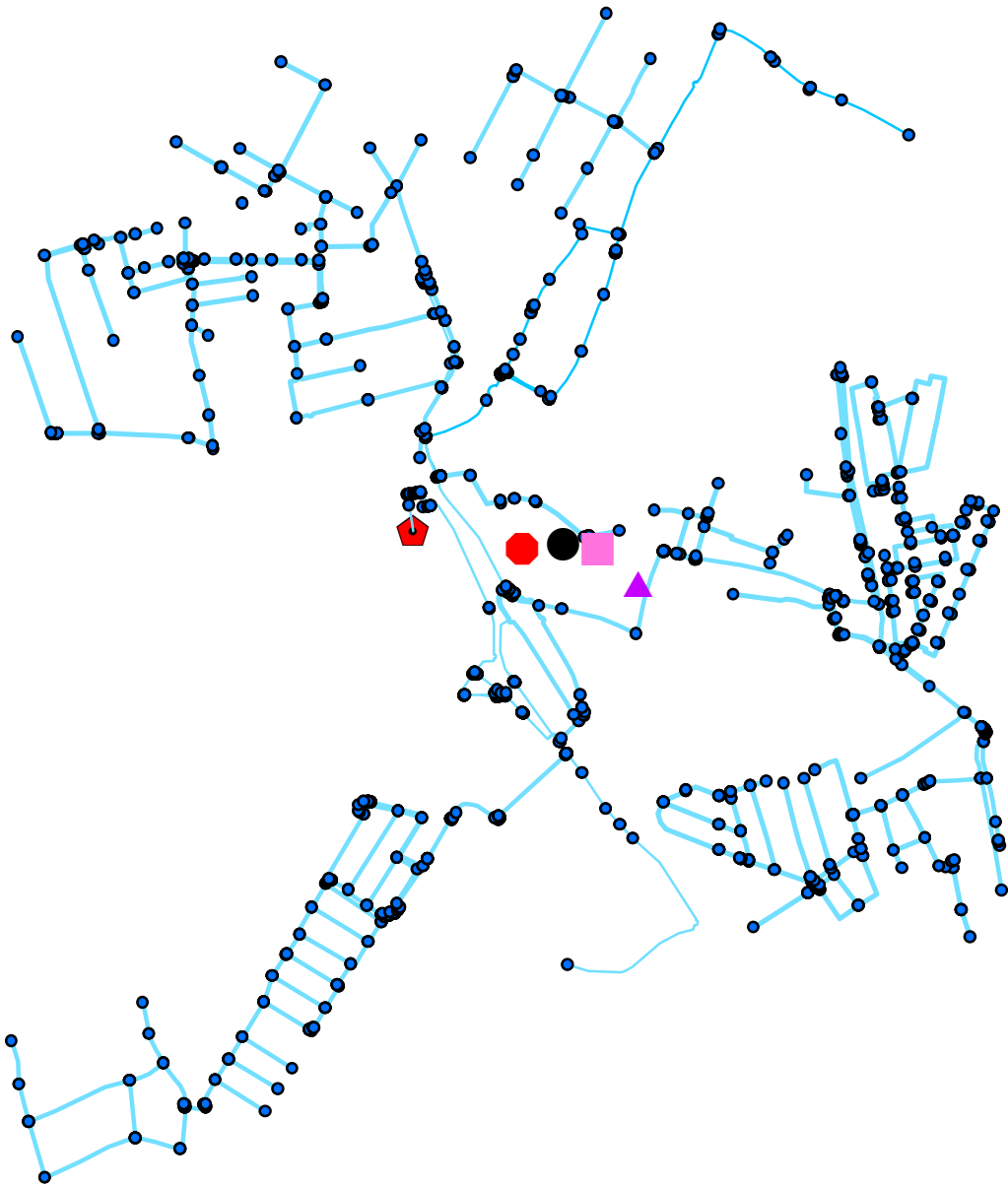
Indicadores Geométricos RDAP 1978







Leyenda

- CPs 1978
- CP 1978
- CV 1978
- ▲ CD 1978

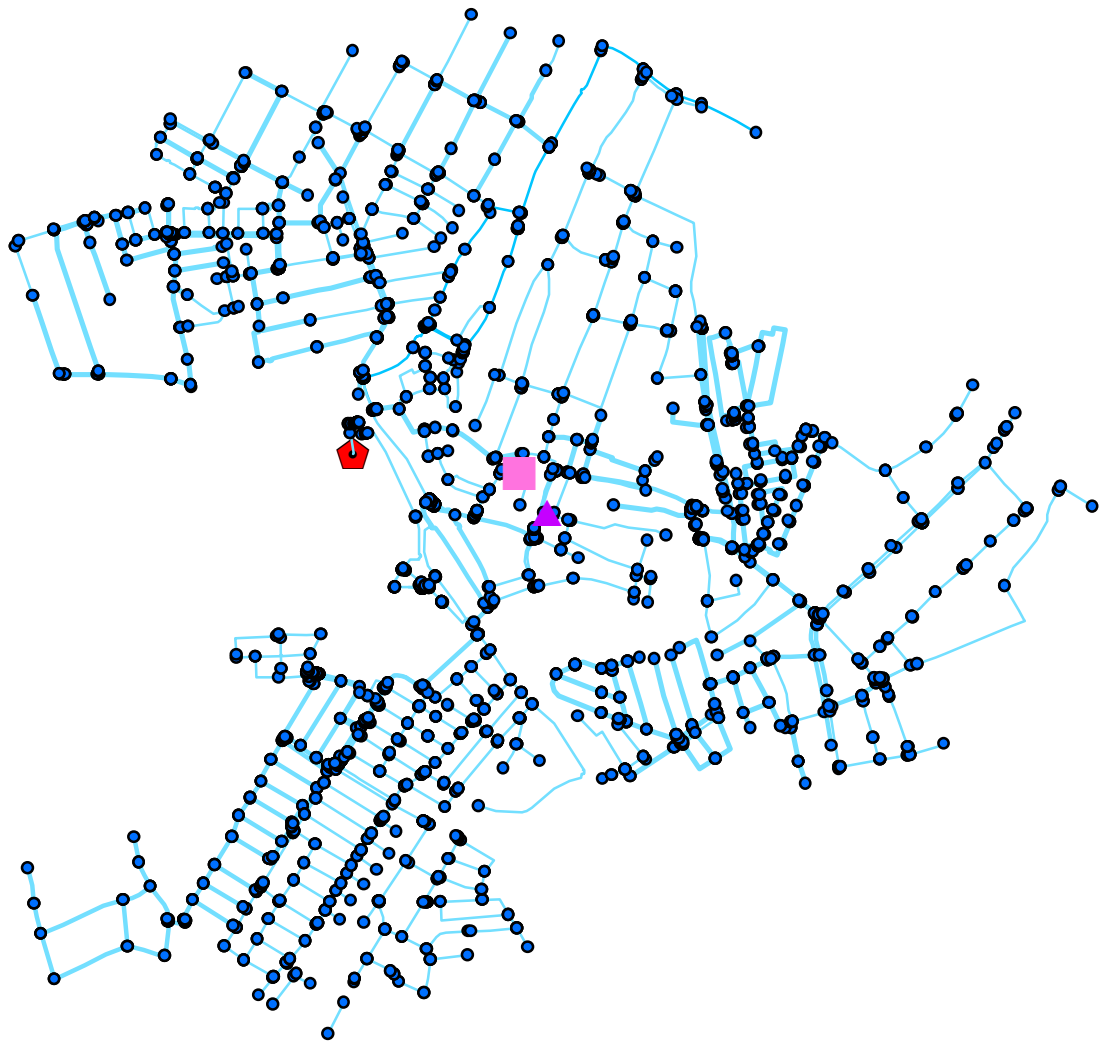
Indicadores Geométricos RDAP 1991





Leyenda

-  CPs 1991
-  CP 1991
-  CV 1991
-  CD 1991

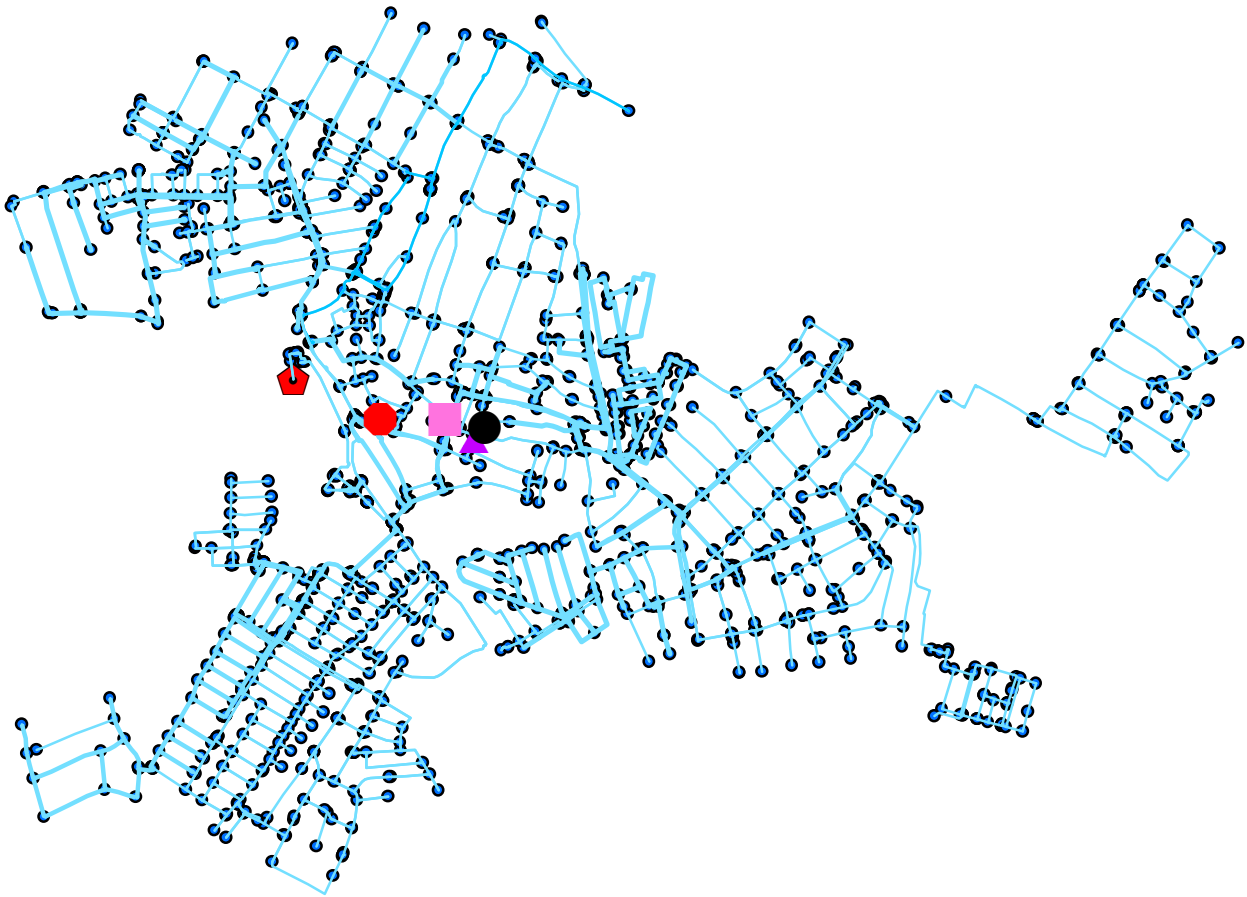
Indicadores Geométricos RDAP 2000







Leyenda

-  CV 2000
-  CD 2000

Indicadores Geométricos RDAP 2011



Legenda

-  CPs 2011
-  CP 2011
-  CV 2011
-  CD 2011