

**PROYECTO DE GRADO**

**REVISIÓN CRÍTICA DEL CRITERIO DE ÍNDICE DE RESILIENCIA DE UNA  
RDAP VERSUS OTROS ÍNDICES QUE DESCRIBAN LA CONFIABILIDAD  
DE LA RED**

**Andrés Felipe Cortés Moreno**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por apoyarme y acompañarme en momentos buenos y malos todos estos años,  
a mi asesor, Juan Saldarriaga, por guiarme, exigirme y hacer posible este proyecto,  
al profesor Ezio Todini, por compartir conmigo sus conocimientos y su experiencia,  
a todos aquellos, que de una u otra forma, estuvieron conmigo y me apoyaron en la realización de este proyecto,  
a mi abuelo, por guiarme en la vida y ser mi ejemplo a seguir.

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivo General .....	3
1.1.2	Objetivos Específicos.....	3
2	CONCEPTOS RELEVANTES .....	4
2.1	RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE (RDAP).....	4
2.2	CONFIABILIDAD .....	4
2.3	RESILIENCIA .....	5
3	MARCO TEÓRICO.....	6
3.1	ÍNDICE DE RESILIENCIA.....	6
3.1.1	MODIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA.....	8
3.2	ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LA RED .....	9
3.3	ÍNDICE DE FALLA.....	10
3.4	POTENCIA ESPECÍFICA .....	11
3.5	SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA.....	11
3.6	DÉFICIT DE ALTURA MEDIA .....	12
3.7	SUPERÁVIT MÍNIMO.....	13
3.8	SUPERÁVIT TOTAL .....	13
3.9	PRESIÓN MÍNIMA.....	14
4	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE CADA RED .....	15
4.1	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	15
4.2	DIAGRAMA DE FLUJO .....	15
4.3	PROGRAMAS UTILIZADOS .....	17
5	REDES UTILIZADAS.....	20
5.1	ALPEROVITS.....	21
5.2	ANDALUCÍA ALTA .....	22

---

5.3	ANDALUCÍA BAJA .....	23
5.4	BOGOTÁ-CAZUCÁ .....	24
5.5	BOLÍVAR.....	25
5.6	BUGALAGRANDE .....	26
5.7	CANDELARIA.....	27
5.8	GINEBRA .....	28
5.9	GUACARÍ.....	29
5.10	HANOI.....	30
5.11	MEDELLÍN .....	31
5.12	R28.....	32
5.13	SAN VICENTE .....	32
6	RESULTADOS .....	34
6.1	ALPEROVITS.....	34
6.2	ANDALUCÍA ALTA .....	35
6.3	ANDALUCÍA BAJA .....	41
6.4	BOGOTÁ – CAZUCÁ .....	46
6.5	BOLÍVAR.....	51
6.6	BUGALAGRANDE .....	56
6.7	CANDELARIA.....	62
6.8	GINEBRA .....	67
6.9	GUACARÍ.....	72
6.10	HANOI.....	78
6.11	MEDELLÍN .....	83
6.12	R28.....	88
6.13	SAN VICENTE .....	93
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	98
7.1	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LA RED .....	98
7.2	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS ÍNDICE DE FALLA.....	99
7.3	ÍNDICE DE RESILIENICA VS TASA DE SATISFACCIÓN DE DEMANDA .....	100

---

7.4	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS DÉFICIT DE ALTURA MEDIA .....	101
7.5	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS SUPERÁVIT MÍNIMO .....	102
7.6	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS SUPERÁVIT TOTAL .....	103
7.7	ÍNDICE DE RESILIENCIA VS POTENCIA ESPECÍFICA .....	103
7.8	DÉFICIT DE ALTURA MEDIA VS ÍNDICE DE FALLA .....	104
7.9	DÉFICIT DE ALTURA NEDIA VS TASA DE SATISFACCIÓN DE DEMANDA .....	105
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	107
8.1	CONCLUSIONES .....	107
8.2	RECOMENDACIONES .....	108
9	Bibliografía .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología seguida. ....	16
Figura 2. Interfaz del programa REDES. ....	17
Figura 3. Captura de pantalla del programa REDES. Ventana de modificación de la red. ....	18
Figura 4. Captura de pantalla del sub-menú Calcular. ....	18
Figura 5. Captura de la ventana de Resultados. ....	19
Figura 6. Red de Alperovits (o Two Loops). ....	21
Figura 7. Red de Andalucía Alta. ....	22
Figura 8. Red de Andalucía Baja. ....	23
Figura 9. Red de Bogotá-Cazucá. ....	24
Figura 10. Red de Bolívar. ....	25
Figura 11. Red de Bugalagrande. ....	26
Figura 12. Red Candelaria. ....	27
Figura 13. Red Ginebra. ....	28
Figura 14. Red de Guacarí. ....	29
Figura 15. Red Hanoi. ....	30
Figura 16. Red de Medellín. ....	31
Figura 17. Red R28. ....	32
Figura 18. Red de San Vicente. ....	32
Figura 19. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia. ....	36
Figura 20. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	36
Figura 21. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de la demanda. ....	37
Figura 22. Ind. Resiliencia vs Déficit de altura media. ....	38
Figura 23. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	38
Figura 24. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	39
Figura 25. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	40
Figura 26. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	42
Figura 27. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	42
Figura 28. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	43

---

Figura 29. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	43
Figura 30. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	44
Figura 31. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	45
Figura 32. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	45
Figura 33. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	47
Figura 34. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	47
Figura 35. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	48
Figura 36. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	48
Figura 37. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	49
Figura 38. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	50
Figura 39. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	50
Figura 40. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	52
Figura 41. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	52
Figura 42. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	53
Figura 43. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	54
Figura 44. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	54
Figura 45. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	55
Figura 46. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	55
Figura 47. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	57
Figura 48. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	58
Figura 49. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	58
Figura 50. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	59
Figura 51. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	60
Figura 52. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	60
Figura 53. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	61
Figura 54. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	63
Figura 55. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	63
Figura 56. Ind Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	64
Figura 57. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	65
Figura 58. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	65

---

Figura 59. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	66
Figura 60. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	66
Figura 61. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	68
Figura 62. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	68
Figura 63. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	69
Figura 64. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	70
Figura 65. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	70
Figura 66. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	71
Figura 67. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	71
Figura 68. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	73
Figura 69. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	73
Figura 70. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	74
Figura 71. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	75
Figura 72. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	76
Figura 73. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	76
Figura 74. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	77
Figura 75. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	79
Figura 76. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	79
Figura 77. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	80
Figura 78. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	80
Figura 79. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	81
Figura 80. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	82
Figura 81. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	82
Figura 82. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red. ....	84
Figura 83. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	84
Figura 84. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda. ....	85
Figura 85. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	85
Figura 86. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	86
Figura 87. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	87
Figura 88. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	87

---

Figura 89. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.....	89
Figura 90. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	89
Figura 91. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.....	90
Figura 92. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	91
Figura 93. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	91
Figura 94. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	92
Figura 95. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	92
Figura 96. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.....	94
Figura 97. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla. ....	94
Figura 98. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.....	95
Figura 99. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media. ....	95
Figura 100. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo. ....	96
Figura 101. Ind. Resiliencia vs Superávit Total. ....	96
Figura 102. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica. ....	97
Figura 103. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red para todas las redes.....	98
Figura 104. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla para todas las redes. ....	99
Figura 105. Ind. Resiliencia vs Tasa de Satisfacción de Demanda para todas las redes. ....	100
Figura 106. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media para todas las redes. ....	101
Figura 107. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo para todas las redes. ....	102
Figura 108. Ind. Resiliencia vs Superávit Total para todas las redes. ....	103
Figura 109. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica para todas las redes.....	104
Figura 110. Déficit de Altura Media vs Ind. Falla para todas las redes. ....	105
Figura 111. Déficit de Altura Media vs Tasa de Satisfacción de Demanda para todas las redes.....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las características principales de las redes utilizadas.....	33
Tabla 2. Resultados de la red de Alperovits. ....	34
Tabla 3. Resultados de Andalucía Alta.....	35
Tabla 4. Resultados para Andalucía Baja. ....	41
Tabla 5. Resultados de Bogotá-Cazucá.....	46
Tabla 6. Resultados para Bolívar. ....	51
Tabla 7. Resultados de Bugalagrande.....	56
Tabla 8. Resultados de Candelaria.....	62
Tabla 9. Resultados de Ginebra. ....	67
Tabla 10. Resultados de Guacarí. ....	72
Tabla 11. Resultados para Hanoi. ....	78
Tabla 12. Resultados Medellín. ....	83
Tabla 13. Resultados R28. ....	88
Tabla 14. Resultados San Vicente.....	93

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Potencia Total. ....	6
Ecuación 2. Variación Potencia Total.....	6
Ecuación 3. Potencia de cada nudo.....	6
Ecuación 4. Índice de resiliencia, definición. ....	7
Ecuación 5. $P^*_{int}$ .....	7
Ecuación 6. $P^*_{max}$ .....	7
Ecuación 7. Índice de Resiliencia. ....	7
Ecuación 8. Índice de Resiliencia con bombas. ....	7
Ecuación 9. Superávit de potencia. ....	8
Ecuación 10. Índice de Resiliencia modificado. ....	9
Ecuación 11. Uniformidad de diámetros. ....	9
Ecuación 12. Superávit de potencia ponderado.....	9
Ecuación 13. Potencia.....	9
Ecuación 14. Definición índice de resiliencia de la red.....	10
Ecuación 15. $X_{max}$ .....	10
Ecuación 16. Índice de Resiliencia de la red. ....	10
Ecuación 17. Índice de Falla.....	10
Ecuación 18. Metodología de cálculo índice de falla.....	11
Ecuación 19. Potencia específica de la red.....	11
Ecuación 20. Potencia específica de cada nudo. ....	11
Ecuación 21. Tasa de satisfacción de demanda.....	12
Ecuación 22. Caso 1. ....	12
Ecuación 23. Caso 2. ....	12
Ecuación 24. Caso 3. ....	12
Ecuación 25. Mean Head Déficit.....	13
Ecuación 26. Caso 1. ....	13
Ecuación 27. Caso 2. ....	13
Ecuación 28. Minimum Surplus o Superávit Mínimo. ....	13



---

Ecuación 29. Total Surplus o Superávit Total. .... 14

## 1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la vida y para el desarrollo en general de la humanidad como sociedad. Es por esto que la distribución de la misma siempre ha representado una prioridad para las personas. Los sistemas de riego incas y los acueductos romanos en la época del imperio, entre otros, son ejemplos irrefutables de la importancia de este recurso. Hoy en día, las redes de distribución se caracterizan por ser complejas y por estar conformadas por un gran número de nudos, tuberías, tanques y demás accesorios. La complejidad de las redes, los incrementos en la demanda y la importancia de garantizar tanto el suministro como la calidad del agua han intensificado la preocupación de la ingeniería por crear redes seguras y confiables.

Optimizar el funcionamiento, el diseño, los costos y la confiabilidad de las RDAP es uno de los mayores desafíos que enfrenta la ingeniería en el ámbito de los recursos hídricos, no solo por la importancia que tiene el agua en la vida de una persona, sino también porque según la organización mundial de la salud, el agua es un derecho fundamental de cada ser humano, es decir que no se le puede negar en ninguna circunstancia, (Shuang, Zhang, & Yuan, 2014).

A pesar de estos esfuerzos, ninguna red de distribución está exenta de presentar algún tipo de falla, como puede ser la rotura de alguna tubería o la presencia de fugas en la misma. Eventos en los cuales el suministro de agua se puede ver completamente interrumpido o puede tener deficiencias de calidad. Es por esto, que la confiabilidad de las redes adquiere un papel fundamental al evaluar una RDAP, (Prasad, Hong, & Park, 2003).

La mayor parte de los estudios realizados intentan, como ya se mencionó, evitar estos problemas a partir del diseño. Diferentes metodologías se han desarrollado en los últimos años para garantizar diseños óptimos en términos de confiabilidad, costos y demás características de la red. Sin embargo, determinar a partir de qué parámetros se debe evaluar la confiabilidad de redes ya construidas, es un área que no se ha desarrollado en su totalidad.

A pesar de que existen diferentes metodologías para evaluar esta confiabilidad no existe una homogeneidad al momento de seleccionar uno de estos criterios cómo el más adecuado para evaluar un red. Entre los índices mas relevantes se encuentran: el índice de resiliencia, desarrollado Ezio Todini (Todini, 2000), la potencia específica (Saldarriaga, 2010) el índice de resiliencia de la red (Prasad & Park, 2004) (Creaco, Franchini, & Todini, 2014), que considera la uniformidad de diámetros de la red y la tasa de satisfacción de demanda (Creaco, Fortunato, Franchini, & Mazzola, 2014).

La ausencia y la necesidad de establecer un criterio único para realizar estas evaluaciones son los motivos principales que llevan al desarrollo de este proyecto. A través de un análisis crítico del índice de resiliencia, comparado con otros indicadores de confiabilidad que se explicarán en los siguientes capítulos, se pretende analizar la idoneidad de cada uno de estos índices para evaluar una RDAP. El resultado que se espera de este proyecto, es la selección y justificación de un índice, o un grupo de índices, que al ser utilizados permitan cuantificar adecuadamente la confiabilidad de una red de distribución de agua potable.

Para desarrollar la temática planteada se determinó la siguiente estructura para el presente documento:

- Capítulo 1: En el primer capítulo se presentó una breve introducción al contexto en el cual se desarrollara este documento; adicionalmente se incluyen los objetivos generales y específicos que se busca cumplir.
- Capítulo 2: En el capítulo 2 se realizan una serie de definiciones pertinentes para el desarrollo de este documento. Entre los conceptos que se definen están la confiabilidad y la resiliencia de una red.
- Capítulo 3: En el tercer capítulo del documento se realiza la descripción de los índices de confiabilidad que se utilizarán para este proyecto. En esta descripción se incluyen tanto fórmulas como conceptos relevantes de cada índice.
- Capítulo 4: En el capítulo 4 se presenta el procedimiento que se siguió para el análisis de cada red; adicionalmente se incluye una breve descripción de las herramientas utilizadas, en este caso el programa REDES.
- Capítulo 5: En el quinto capítulo se presentan los esquemas y las características más importantes de las redes utilizadas en este proyecto.
- Capítulo 6: En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada red, por separado. Adicionalmente se realiza un breve análisis de dichos resultados.
- Capítulo 7: En el capítulo 7 se presenta un análisis comparativo de resultados. Esto se realiza confrontando el comportamiento de los diferentes índices para todas las simulaciones realizadas.
- Capítulo 8: En el capítulo 8 se presentan las conclusiones que se obtuvieron al finalizar este proyecto. Adicionalmente se presentan una serie de recomendaciones tanto para el uso de los diferentes índices como para extender esta investigación, de ser necesario.
- Capítulo 9: En el último capítulo se presenta la bibliografía utilizada en el proyecto y en el documento.

## 1.1 Objetivos

A continuación se presentan los objetivos del proyecto:

### 1.1.1 Objetivo General

- Realizar un análisis crítico del índice de resiliencia, comparándolo con diferentes indicadores de confiabilidad, de tal manera que sea posible determinar la metodología más apropiada para cuantificar la confiabilidad de una RDAP.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Se busca seleccionar, entre los índices propuestos, el más adecuado para evaluar la confiabilidad de una red. Adicionalmente, se comparará este indicador con el índice de resiliencia.
- Analizar redes con diferentes características. Esto se realiza, de tal manera que el análisis que se realizará sea aplicable a diferentes circunstancias; las conclusiones a las que se desea llegar deben ser válidas para cualquier red.
- Junto al análisis de los diferentes índices propuestos, se evaluará el comportamiento de las redes seleccionadas, ante una serie de fallas simuladas en el programa REDES.
- Se busca evaluar el funcionamiento y el uso del índice de resiliencia como cuantificador de la confiabilidad de una RDAP, dado que es el indicador más utilizado en la actualidad.
- A partir de las simulaciones que se realizarán se busca analizar y explicar el comportamiento de los índices seleccionados, teniendo en cuenta las características de cada red.

## 2 CONCEPTOS RELEVANTES

En el presente capítulo se realiza una descripción de algunos conceptos relevantes para el desarrollo y el entendimiento del presente proyecto.

### 2.1 RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE (RDAP)

Una RDAP o red de distribución de agua potable, es un sistema conformado por tuberías, nudos, tanques, bombas, válvulas y demás accesorios, que permiten el suministro adecuado de agua potable a los distintos nudos de consumo. Con suministro adecuado se hace referencia al cumplimiento de estándares tanto de calidad como de cantidad. Es decir que debe garantizar la satisfacción total de la demanda y la existencia de presiones mínimas en los nudos.

Existen tres tipos de redes: Redes abiertas, redes cerradas y redes de riego. En este estudio se utilizarán únicamente redes cerradas, las cuales se caracterizan por tener al menos un circuito cerrado (o loop) dentro del sistema, (Saldarriaga J. , 2007). La existencia de estos circuitos influye directamente en la confiabilidad de las redes, como se verá en los siguientes capítulos.

### 2.2 CONFIABILIDAD

En el ámbito de redes de distribución se han realizado diferentes estudios para encontrar una definición de confiabilidad. Sin embargo, para este trabajo, se considerarán principalmente las siguientes definiciones: En primer lugar se consideró la definición propuesta por Mays, quien define la confiabilidad como la probabilidad de que no exista una falla que impida a la red cumplir sus objetivos. A pesar de que Mays identifica los factores de riesgo principales que afectan la confiabilidad de una red, éstos no se utilizarán en el presente documento (Mays).

En segundo lugar se consideró la definición de Ugarelli y Maglionico, quienes afirman que la confiabilidad de una red se entiende como la capacidad de la red de cumplir con los niveles mínimos de presión requeridos en cada nudo. (Maglionico & Ugarelli) Por último se consideró la aproximación realizada por Todini (Todini, 2000), quien argumenta que no existe una definición universalmente aceptada para la confiabilidad de una red de distribución y por ende, introduce el concepto de “resiliencia” como una aproximación para asegurar la confiabilidad de una red, y no para definirla.

## 2.3 RESILIENCIA

El concepto de resiliencia hace referencia a la capacidad de una red de reaccionar y sobreponerse a la existencia de alguna falla. Como se mencionó anteriormente, a pesar de que este concepto no intenta explicar qué es la confiabilidad de una red, esta nueva característica tiene una relación directa con el concepto de confiabilidad. Es decir que, al aumentar la resiliencia de una red, simultáneamente, se aumenta la confiabilidad de la misma, (Todini, 2000).

Partiendo de los tres conceptos presentados anteriormente, para este documento se consideró adecuado entender la confiabilidad de una red como la capacidad de una RDAP de funcionar adecuadamente, es decir satisfacer la demanda en los nudos, con o sin la existencia de fallas. Esta capacidad se puede considerar como una función de las características hidráulicas de la red, (Presión y caudal en los nudos).

### 3 MARCO TEÓRICO

A continuación se presenta una breve descripción de los principales conceptos a los que se hace referencia a lo largo del presente documento

#### 3.1 ÍNDICE DE RESILIENCIA

El índice central de este estudio es el de resiliencia, desarrollado por Ezio Todini, el cual parte del concepto de resiliencia y de la potencia disponible dentro de una RDAP. La suposición básica es que, al aumentar la potencia disponible en cada nudo, en el momento que se presente una falla, existirá un superávit de energía suficiente para compensar las pérdidas de energía generadas por dicha falla. A continuación se presenta el proceso deductivo de este índice:

En primer lugar se define la potencia total de una red como:

$$P_{tot} = \sum_{k=1}^{nk} Q_k H_k$$

**Ecuación 1. Potencia Total.**

donde nk representa el número de embalses o tanques en la red;  $Q_k$  representa el caudal saliente de cada embalse y  $H_k$  la altura de cada embalse.

Adicionalmente se tiene que:

$$P_{tot} = P_{int} + P_{ext}$$

**Ecuación 2. Variación Potencia Total.**

donde  $P_{int}$  representa la potencia disipada en las tuberías y  $P_{ext}$  la potencia que llega a cada nudo.

La potencia en cada nudo se obtiene como:

$$P_{ext} = \sum_{i=1}^n q_i h_i$$

**Ecuación 3. Potencia de cada nudo.**

donde  $q_i$  es el caudal real en cada nudo,  $h_i$  es la altura de presión en cada nudo y n es el número de nudos de la red.

El índice de resiliencia es definido por Todini como:

$$I_r = 1 - (P_{int}^* / P_{max}^*)$$

**Ecuación 4. Índice de resiliencia, definición.**

donde  $P_{int}^*$  y  $P_{max}^*$  se definen como:

$$P_{int}^* = P_{tot} - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* h_i^*$$

**Ecuación 5.  $P_{int}^*$ .**

$$P_{max}^* = P_{tot} - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* h_i^*$$

**Ecuación 6.  $P_{max}^*$ .**

donde n, nuevamente, es el número de nudos de la red,  $q_i^*$  representa la demanda base de cada nudo,  $h_i^*$  la presión requerida en cada nudo y  $h_i$  la altura de presión en cada nudo.

Reemplazando en la Ecuación 4 e ignorando la presencia de bombas en las redes, puesto que en las redes utilizadas este término es igual a cero, finalmente se obtiene la siguiente fórmula para el índice de resiliencia:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{nk} \dot{Q}_k H_k - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* h_i^*}$$

**Ecuación 7. Índice de Resiliencia.**

La ecuación considerando el efecto de bombas es la siguiente:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{nk} \dot{Q}_k H_k + \sum_{j=1}^{np} (P_j / g) - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i^* h_i^*}$$

**Ecuación 8. Índice de Resiliencia con bombas.**

Este índice siempre debe presentar valores entre cero y uno. Una red se considera resiliente siempre que este sea mayor a 0.5.

### 3.1.1 MODIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA

Simultáneamente al desarrollo de esta investigación, Todini presentó una modificación para el índice de resiliencia en casos donde los problemas son controlados por la presión y no por la demanda (Todini, 2015). Esta modificación garantiza que en ningún caso se presenten valores para el índice menores a cero, situación que se presentaba en algunas simulaciones de este proyecto. Teniendo en cuenta que la nueva formulación presenta un funcionamiento más general y las recomendaciones del mismo Ezio Todini, en este proyecto se utilizó la fórmula de índice de resiliencia que se presenta a continuación:

Recordando la fórmula del índice de resiliencia:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{a} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{nk} \dot{a} Q_k H_k - \sum_{i=1}^n \dot{a} q_i^* h_i^*}$$

Un supuesto de la fórmula es que se utiliza para problemas en donde la demanda controla el funcionamiento de la red, por ende se supone que siempre la presión en los nudos es mayor a la mínima:

$$h_i \geq h_i^*$$

Cuando esto no se cumple, es posible encontrar valores de  $I_r$  menores a cero, por lo cual Todini introduce la siguiente modificación para redes en donde la presión se convierte en el factor determinante en su funcionamiento (Pressure driven problems). En primer lugar introduce el término de superávit de potencia:

$$D(P_e / g) = \sum_{i=1}^n q_i(h_i)h_i - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*$$

**Ecuación 9. Superávit de potencia.**

en donde  $q_i(h_i)$  corresponde a la demanda actual de cada nudo,  $h_i$  corresponde a la presión correspondiente a dicha demanda,  $q_i^*$  la demanda base de cada nudo y  $h_i^*$  la presión mínima requerida en cada nudo.

Cuando este superávit es menor a cero, el índice debe tomar un valor igual a cero, pues si no existe un superávit de potencia en la red la resiliencia debe ser cero.

$$D(P_e / g) < 0$$

$$I_r = 0$$

Sin embargo, cuando este superávit es mayor, el índice se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_r = \frac{D(P_e / g)}{\sum_{k=1}^{nk} Q_k H_k - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*}$$

**Ecuación 10. Índice de Resiliencia modificado.**

### 3.2 ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LA RED

El índice de resiliencia de la red es una modificación del índice de resiliencia desarrollado inicialmente por Prasad y Park en el 2003. A diferencia del índice de Todini, éste considera la uniformidad de los diámetros de las tuberías conectadas a cada nudo. Prasad afirma que la redundancia en los diámetros contribuye, con el superávit de energía, a aumentar la resiliencia de una red, (Prasad & Park, 2004).

La uniformidad de diámetros se calcula cómo:

$$C_j = \frac{\bar{a}_{i=1}^{np_j} D_i}{np_j \cdot \max\{D_i\}}$$

**Ecuación 11. Uniformidad de diámetros.**

donde  $n_p$  corresponde al número de tuberías conectadas al nudo y  $D_i$  corresponde al diámetro de cada tubería conectada al nudo.

Para considerar el efecto de uniformidad de diámetros y del superávit de potencia, Prasad introduce el término de superávit de potencia ponderada:

$$X_j = C_j P_j$$

**Ecuación 12. Superávit de potencia ponderado.**

donde  $P_j$  se calcula de la siguiente manera:

$$P_j = q_i^* (h_i - h_i^*)$$

**Ecuación 13. Potencia.**

Prasad introduce la siguiente ecuación para calcular el índice de resiliencia de la red:

$$I_n = \frac{X}{X_{\max}}$$

**Ecuación 14. Definición índice de resiliencia de la red.**

donde  $X_{\max}$  se calcula como:

$$X_{\max} = P_{inp} - \sum_{j=1}^{nn} q_j h_j^*$$

**Ecuación 15.  $X_{\max}$ .**

La ecuación definitiva, sin considerar el efecto de las bombas, reemplazando en la Ecuación 14 es la siguiente:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n C_i q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{nk} Q_k H_k - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*}$$

**Ecuación 16. Índice de Resiliencia de la red.**

Al igual que el índice de resiliencia, cuando se obtienen valores mayores a 0.5, se considera que la red es resiliente.

### 3.3 ÍNDICE DE FALLA

El índice de falla, desarrollado por Todini, utiliza las características hidráulicas de la red (presión y caudal) para evaluar la confiabilidad de la red y evaluar el efecto de las fallas. La ecuación para calcularlo es la siguiente:

$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^n I_{f_i}}{\sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*}$$

**Ecuación 17. Índice de Falla.**

donde  $I_{fi}$  depende de la presión de cada nudo:

$$I_{f_i} = \begin{cases} 0 \rightarrow " i:h_i \geq h_i^* \\ q_i^*(h_i^* - h_i) \rightarrow " i:h_i < h_i^* \end{cases}$$

**Ecuación 18. Metodología de cálculo índice de falla.**

Cuando este índice es igual a cero, se puede afirmar que la red es confiable, puesto que todas las presiones son mayores a la presión mínima requerida. Sin embargo, a medida que su valor aumenta, se puede considerar que la red pierde confiabilidad pues la presión requerida es mayor a la disponible, (Todini, 2000).

### 3.4 POTENCIA ESPECÍFICA

La potencia específica de una red se define como la suma de las potencias específicas de las tuberías que la conforman. Saldarriaga la define como una potencia por unidad de peso que se calcula como la diferencia de alturas piezométricas de los nudos multiplicada por el caudal que fluye por cada tubería, (Saldarriaga, Ochoa, Moreno, Romero , & Cortés , 2010).

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_{e_i}$$

**Ecuación 19. Potencia específica de la red.**

$$P_{e_i} = q_i(h_{i, inicial} - h_{i, final})$$

**Ecuación 20. Potencia específica de cada nudo.**

La determinación del nudo inicial y final depende de la dirección del flujo.

### 3.5 SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA

La tasa de satisfacción de demanda fue desarrollada por Creaco et al. como una medida directa de la confiabilidad de una red de distribución. A diferencia del índice de falla, que únicamente considera las presiones de la red, la tasa de satisfacción de demanda considera tanto presiones como caudales (Creaco, Fortunato, Franchini, & Mazzola, 2014). Cuando esta tasa adopta valores cercanos a uno, siendo éste el valor máximo posible, se puede afirmar que la red es confiable. Mientras que si se obtienen valores cercanos a cero se debe definir la red como poco confiable. La tasa se calcula como:

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n q_i}$$

**Ecuación 21. Tasa de satisfacción de demanda.**

donde  $q$  es el caudal de cada nudo,  $n$  es el número de nudos y  $a$  es una variable que se calcula de la siguiente manera:

cuando la presión es menor a la presión mínima:

$$a_i = 0 \rightarrow h < h^*$$

**Ecuación 22. Caso 1.**

cuando la presión es mayor a la mínima, pero menor a una presión requerida ( $h_r$ ), que para este estudio se definió como veinte metros de columna de agua (20 m),  $a$  se calcula como:

$$a_i = q_i \left( \frac{h_i - h^*}{h_r - h^*} \right)^{0.5} \rightarrow h^* \leq h_i < h_r$$

**Ecuación 23. Caso 2.**

por último cuando la presión es mayor a la presión requerida, la variable  $a$  se calcula como:

$$a_i = q_i \rightarrow h_i > h_r$$

**Ecuación 24. Caso 3.**

### 3.6 DÉFICIT DE ALTURA MEDIA

El déficit de altura media, o mean head deficit, fue desarrollado por Greco, Di Nardo y Santonastaso, como una medida para evaluar el comportamiento de una red. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, las condiciones hidráulicas de la red tienen una relación directa con la confiabilidad de la misma. Por esta razón, para este proyecto, cuando el MHD es igual a cero se entiende que la red es confiable, pues no se tiene un déficit de presiones. Sin embargo, cuando tiene un valor distinto a cero se debe interpretar como una disminución en la confiabilidad de la red (Di Nardo, Greco, & Santonastaso). Este índice resulta útil al emplearse en conjunto con alguno de los anteriormente descritos.

$$MHD = \frac{\sum_{i=1}^n H_i q_i}{Q}$$

**Ecuación 25. Mean Head Déficit.**

donde Q representa el caudal total en la red y  $H_i$  es una variable que se calcula como:

$$H_i = 0 \rightarrow h_i \geq h^*$$

**Ecuación 26. Caso 1.**

cuando la presión en un nudo es mayor a la presión mínima y:

$$H_i = h^* - h_i \rightarrow h_i < h^*$$

**Ecuación 27. Caso 2.**

cuando la presión del nudo es menor a la presión mínima.

### 3.7 SUPERÁVIT MÍNIMO

El superávit mínimo se define como la mínima diferencia entre la presión disponible y la requerida entre todos los nudos del sistema. Este índice puede tomar valores negativos, cuando la presión disponible es menor a la mínima. Para Atkinson et al. al aumentar el superávit mínimo es posible aumentar la confiabilidad de la red (Atkinson, Farmani, Memon, & Butler, 2014). De igual manera es recomendable utilizar este índice junto a alguno de los descritos previamente.

$$I_s = \min(h_{d,i} - h_{\min})$$

**Ecuación 28. Minimum Surplus o Superávit Mínimo.**

donde  $h_{d,i}$  corresponde a la presión actual o disponible en cada nudo y  $h_{\min}$  es la presión mínima.

### 3.8 SUPERÁVIT TOTAL

El superávit total de energía hace referencia a la sumatoria del superávit en todos los nudos. Como se mencionó en la sección 3.2 y 3.3, maximizar el superávit total de energía de una red, significa aumentar tanto la resiliencia como la confiabilidad de una RDAP. A diferencia del índice anterior, que utiliza un mínimo, este utiliza la sumatoria de todos los nudos.

$$I_t = \sum_{i=1}^n (h_{d,i} - h_{\min})$$

Ecuación 29. Total Surplus o Superávit Total.

### 3.9 PRESIÓN MÍNIMA

La presión mínima representa un factor esencial para el cálculo de todos los índices mencionados anteriormente, pues representa un criterio de comparación para las presiones disponibles en la red. Esta presión mínima se determina a través de las normativas locales y regionales. Para este proyecto se tomó la presión mínima como quince metros (15m) en todas las redes excepto en la red de Ginebra. En esta red se tomó la presión mínima como diez metros pues todas las presiones eran relativamente bajas, por lo que al disminuir la presión mínima fue posible realizar un análisis más completo.

## 4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE CADA RED

En este capítulo se explica la metodología seguida en el desarrollo de este proyecto, junto a las herramientas utilizadas y a un diagrama de flujo que clarifica el procedimiento.

### 4.1 METODOLOGÍA UTILIZADA

Para evaluar la confiabilidad de todas las redes se siguió un procedimiento iterativo. En cada iteración, se cerraban una o más tuberías de la red y a continuación se realizaba una simulación hidráulica del comportamiento de la red en el programa REDES, desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA- de la Universidad de los Andes. A pesar de que la selección de las tuberías por cerrar debía ser un proceso aleatorio, esta se realizó arbitrariamente. De esta manera se garantizó tener un número adecuado de simulaciones que comprometieran tuberías relevantes en la red, es decir tuberías cercanas a los tanques o en tramos críticos, y grupos que incluyeran tanto tuberías críticas como no críticas. Tras realizar la simulación de cada escenario, se exportaron los resultados a una hoja de Excel donde se realizaron los cálculos de todos los índices descritos previamente. Al seguir este procedimiento para cada red se obtuvieron los resultados para posteriormente analizarlos y concluir acerca de estos. A continuación se presenta un resumen y un diagrama de flujo que esquematiza el procedimiento seguido en cada red.

- Paso 1: Inicio del procedimiento.
- Paso 2: Entra como variable la red a evaluar.
- Paso 3: Simulación de la red en su estado estable, es decir con todas las tuberías abierta, en el programa REDES.
- Paso 4: Cierre arbitrario de una tubería o de un grupo de estas.
- Paso 5: Simulación en el programa REDES, con las tuberías cerradas.
- Paso 6: Recopilación de los datos y apertura de todas las tuberías.
- Paso 7: Si existen suficientes datos se continua al paso 8, de lo contrario se regresa al paso 3.
- Paso 8: Procesamiento de los datos obtenidos y cálculo de los índices seleccionados.
- Paso 9: Se obtienen como resultado final los índices seleccionados para evaluar la confiabilidad.
- Paso 10: Finaliza el procedimiento.

### 4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación se presenta un diagrama de flujo con los pasos descritos en el numeral anterior. Dentro del diagrama se puede observar el procedimiento que se siguió para el análisis de todos los índices en cada red.

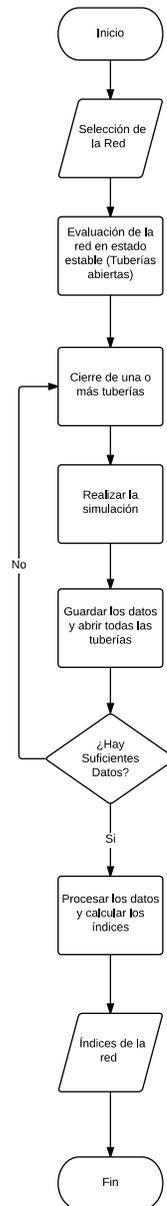


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología seguida.

### 4.3 PROGRAMAS UTILIZADOS

Para desarrollar la investigación se utilizaron dos programas. En primer lugar se utilizó el programa Excel para almacenar los datos y resultados de cada red y para realizar los cálculos de los índices. Para realizar las simulaciones hidráulicas se utilizó el programa REDES, desarrollado por el grupo de investigación CIACUA de la Universidad de los Andes, (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados). Este programa permite cerrar tuberías de la red arbitrariamente y, tras realizar las simulaciones, presenta una serie de resultados, entre los que se encuentran los datos necesarios para el cálculo de los indicadores de confiabilidad. A continuación se presentan algunas capturas de pantalla de dicho programa.

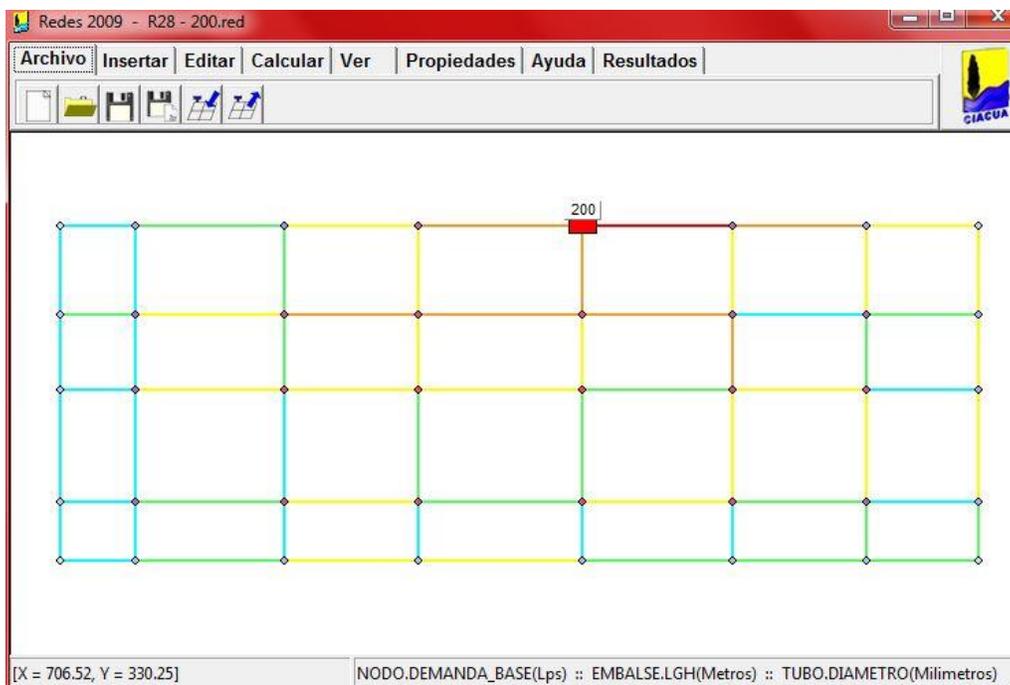
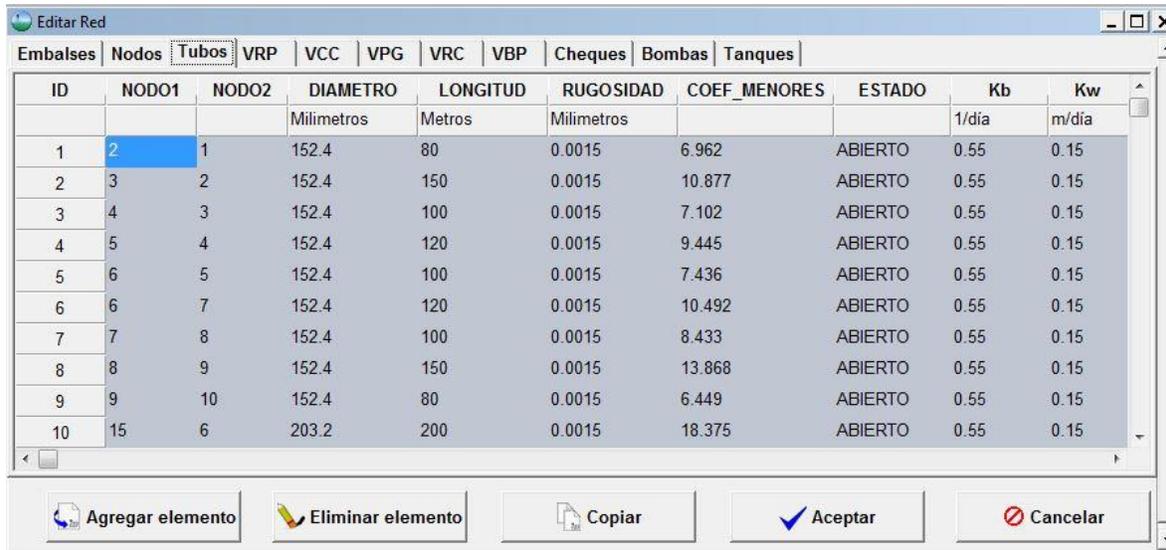


Figura 2. Interfaz del programa REDES.

En la Figura 2 se observa la interfaz del programa REDES con la red R28 cargada.



ID	NODO1	NODO2	DIAMETRO	LONGITUD	RUGOSIDAD	COEF_MENORES	ESTADO	Kb	Kw
			Milímetros	Metros	Milímetros			1/día	m/día
1	2	1	152.4	80	0.0015	6.962	ABIERTO	0.55	0.15
2	3	2	152.4	150	0.0015	10.877	ABIERTO	0.55	0.15
3	4	3	152.4	100	0.0015	7.102	ABIERTO	0.55	0.15
4	5	4	152.4	120	0.0015	9.445	ABIERTO	0.55	0.15
5	6	5	152.4	100	0.0015	7.436	ABIERTO	0.55	0.15
6	6	7	152.4	120	0.0015	10.492	ABIERTO	0.55	0.15
7	7	8	152.4	100	0.0015	8.433	ABIERTO	0.55	0.15
8	8	9	152.4	150	0.0015	13.868	ABIERTO	0.55	0.15
9	9	10	152.4	80	0.0015	6.449	ABIERTO	0.55	0.15
10	15	6	203.2	200	0.0015	18.375	ABIERTO	0.55	0.15

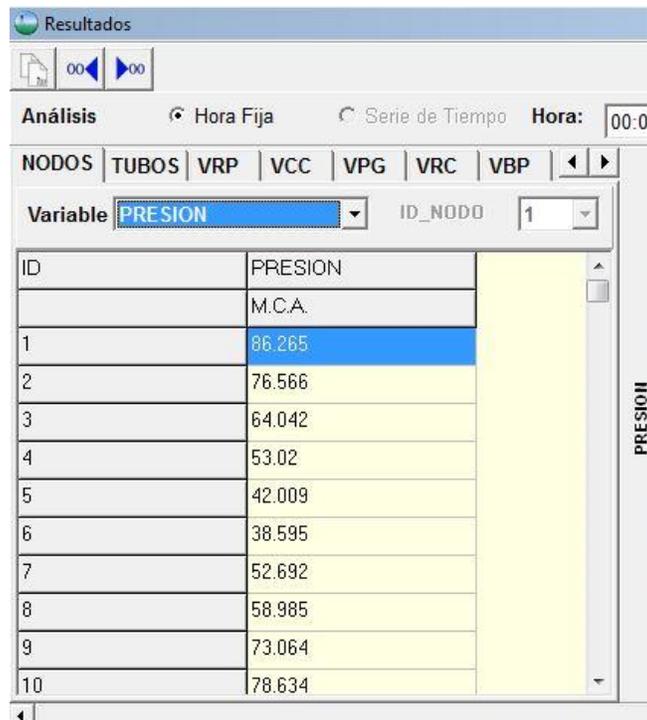
Figura 3. Captura de pantalla del programa REDES. Ventana de modificación de la red.

En la Figura 3 se observa la ventana del programa REDES que permite el cierre y apertura de tuberías de la red. En la columna de “ESTADO” es posible modificar si una tubería se encuentra abierta o cerrada.



Figura 4. Captura de pantalla del sub-menú Calcular.

En la Figura 4 se observan las opciones del sub-menú calcular. Con el botón señalado en rojo se inicia la simulación hidráulica de la red.



ID	PRESION
	M.C.A.
1	86.265
2	76.566
3	64.042
4	53.02
5	42.009
6	38.595
7	52.692
8	58.985
9	73.064
10	78.634

Figura 5. Captura de la ventana de Resultados.

Por último, en la Figura 5, se observa la ventana desplegada por el programa para conocer los resultados de la simulación. Al navegar entre la pestaña de “NODOS” y “TUBOS”, modificando la casilla “Variable” es posible conocer las características tanto hidráulicas como físicas de las tuberías y de los nudos de la red. En este caso se observa la presión en los nudos.

## 5 REDES UTILIZADAS

A continuación se presentan los esquemas de las redes utilizadas en este proyecto. Como se ha mencionado anteriormente ninguna red cuenta con bombas, por lo que en los esquemas solo se observan tuberías (líneas), nudos (puntos) y tanques o embalses (rectángulos). La selección de estas redes se realizó a partir de la disponibilidad de las mismas en primer lugar, posteriormente se realizó una selección basada en sus características, tales como su tamaño, entendiéndose como número de nudos y tuberías, y su redundancia, es decir la existencia de circuitos cerrados y de diferentes “camino” que puede utilizar el flujo para llegar a los distintos nudos. La mayor parte de las redes representan RDAP reales; únicamente se utilizaron tres redes “benchmark” o redes ficticias que se utilizaron como punto de comparación (Alperovits, Hanói y R28).

Sobre las redes seleccionadas es importante mencionar que se eligieron tanto esquemas redundantes, Candelaria o Ginebra, como esquemas en forma de árbol, San Vicente o Bogotá-Cazucá. De igual manera se utilizaron redes con configuraciones intermedias, es decir con secciones redundantes y no redundantes como Guacarí, Andalucía Alta y Medellín.

## 5.1 ALPEROVITS

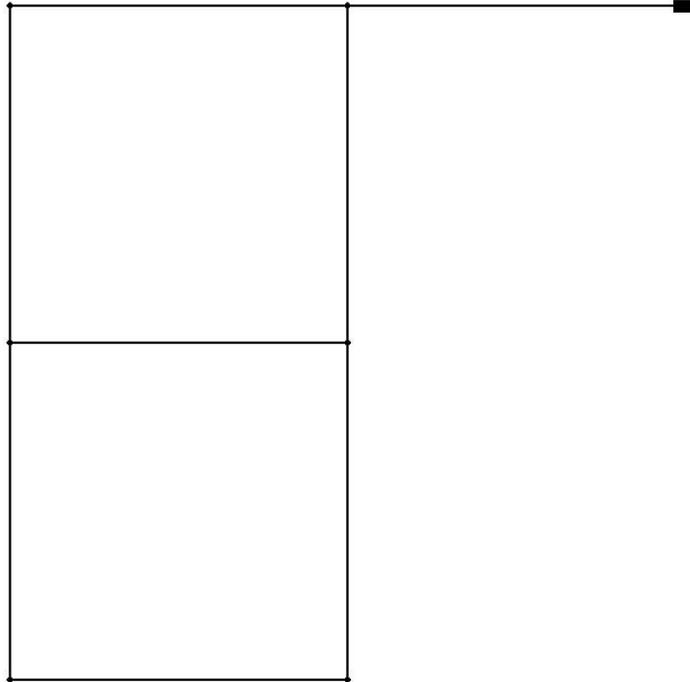


Figura 6. Red de Alperovits (o Two Loops).

Alperovits hace parte el grupo de redes “benchmark”, es decir que es una red ficticia utilizada y aceptada globalmente, como punto de comparación de diferentes conceptos y como red de prueba en diferentes situaciones. Esta red es considerablemente sencilla, pues está conformada por un número limitado de elementos. La red está constituida por 6 nudos, conectados a través de 8 tuberías y de un único embalse que se encarga de suplir todas las demandas de la red.

## 5.2 ANDALUCÍA ALTA

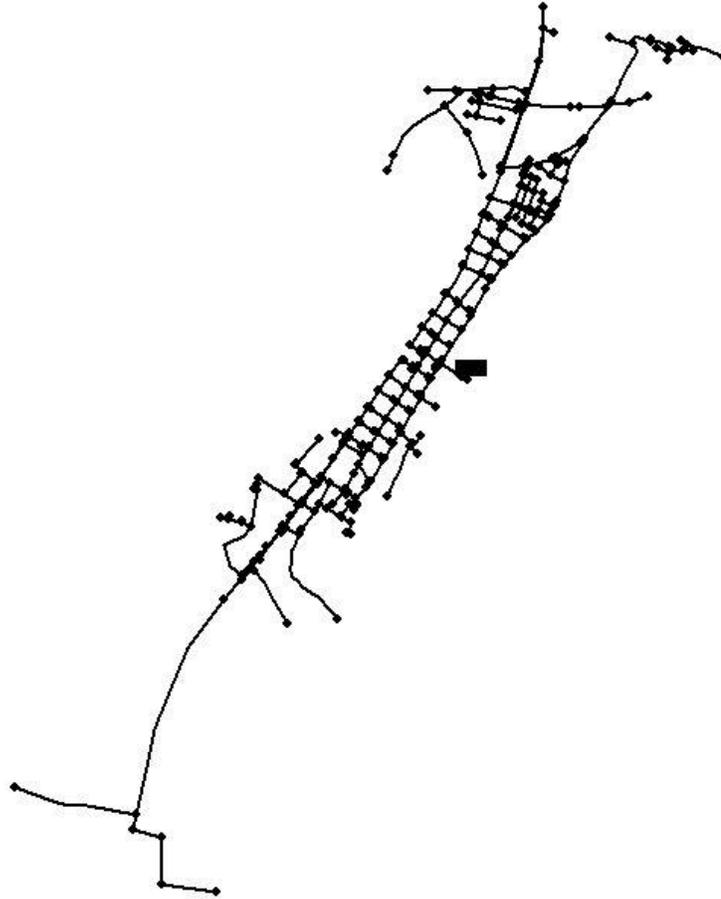


Figura 7. Red de Andalucía Alta.

La siguiente red utilizada fue la de Andalucía Alta. Esta red hace parte de la red real de distribución de agua potable del municipio de Andalucía, ubicado en el departamento del Valle del Cauca, en Colombia. Esta red está compuesta por 329 nudos y 360 tuberías, y es alimentada por un único embalse ubicado prácticamente en el centro de la red. Como se observa en la Figura 7, esta red presenta una geometría prácticamente lineal y presenta un gran número de loops o circuitos cerrados en su interior.

### 5.3 ANDALUCÍA BAJA

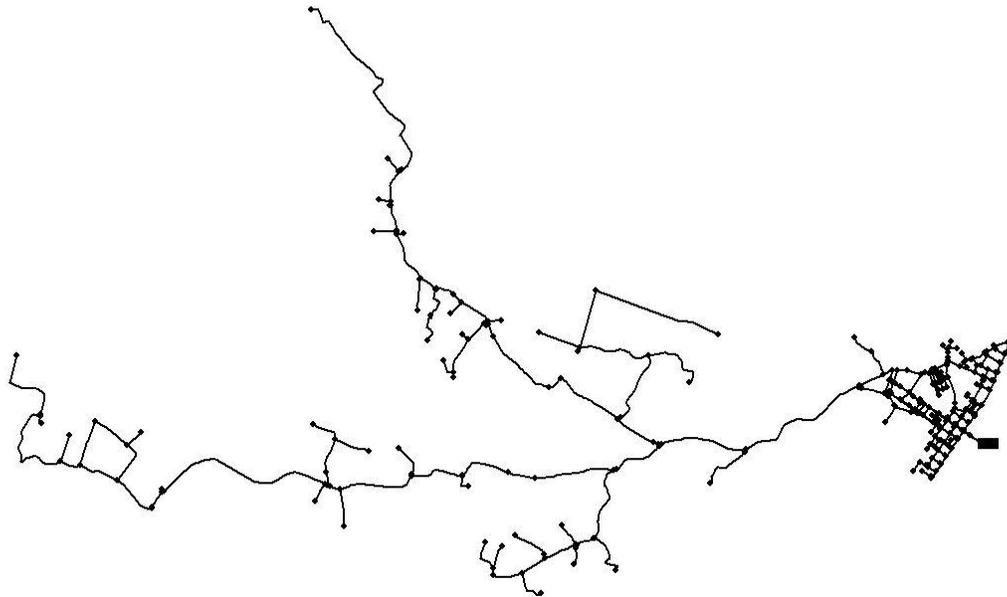


Figura 8. Red de Andalucía Baja.

Al igual que la red anterior, Andalucía Baja hace parte de la red del municipio de Andalucía en el Valle del Cauca. A diferencia del caso anterior, esta red puede ser dividida en dos sectores para ser descrita adecuadamente. Como se observa en la Figura 8, el extremo derecho de la red está conformado principalmente por circuitos cerrados mientras que, tanto el centro como el extremo izquierdo de la red están compuestos principalmente por sistemas lineales sin circuitos cerrados. En total la red está compuesta por un embalse, 358 nudos y 394 tuberías.

## 5.4 BOGOTÁ-CAZUCÁ

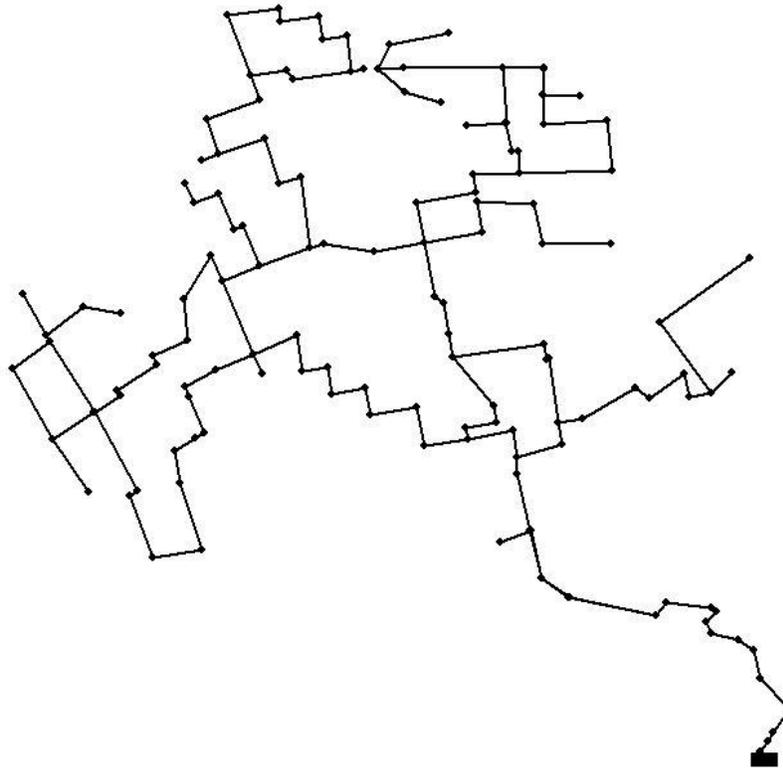


Figura 9. Red de Bogotá-Cazucá.

La red de Bogotá-Cazucá se encuentra en el municipio de Soacha, en Colombia y representa la red de distribución de agua potable de la comuna 4 de dicho municipio. Como se observa en la Figura 9, esta red a pesar de tener algunos circuitos cerrados, se caracteriza principalmente por tener una configuración con forma de árbol y diferentes ramificaciones. La red está compuesta por un único embalse, 145 nudos y 150 tuberías.

## 5.5 BOLÍVAR

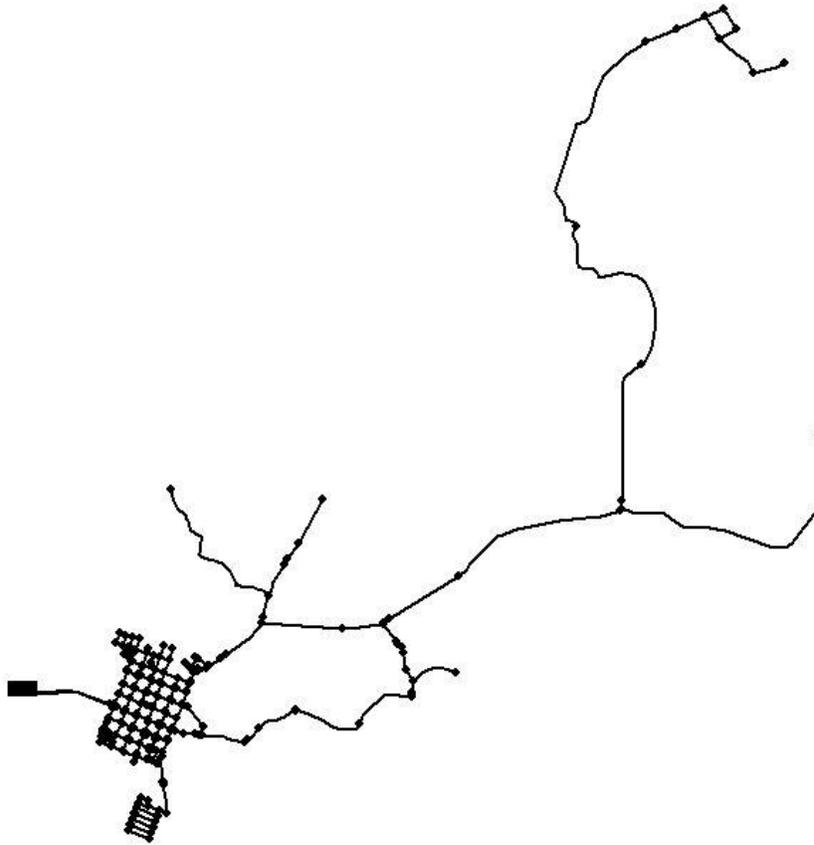


Figura 10. Red de Bolívar.

La red de Bolívar corresponde a la RDAP de un municipio del Valle del Cauca, en Colombia, con el mismo nombre. Esta red se caracteriza principalmente por tener un gran número de circuitos cerrados, sin embargo, como se observa en la Figura 10, tiene una ramificación en el extremo de la derecha que conduce hacia nudos aislados. Esta red, al igual que las anteriores, está compuesta por únicamente un embalse que se encarga de suministrar toda el agua. Adicionalmente, esta red se compone por 283 nudos y 331 tuberías.

## 5.6 BUGALAGRANDE

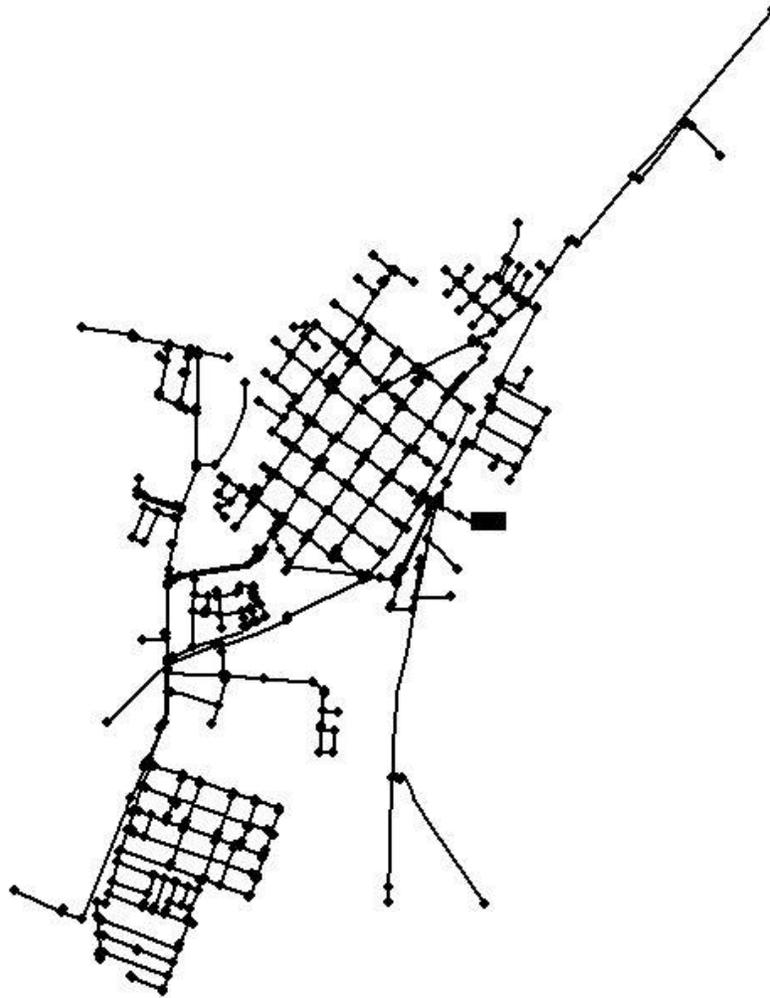


Figura 11. Red de Bugalagrande.

La red ilustrada en la Figura 11, corresponde a la red de distribución de agua potable del municipio de Bugalagrande, ubicado en el Valle del Cauca. Como se observa en la figura anterior, esta red se caracteriza principalmente por tener una gran cantidad de circuitos cerrados y algunas pequeñas ramificaciones. La red está compuesta por un embalse, 582 nudos y 655 tuberías.

## 5.7 CANDELARIA

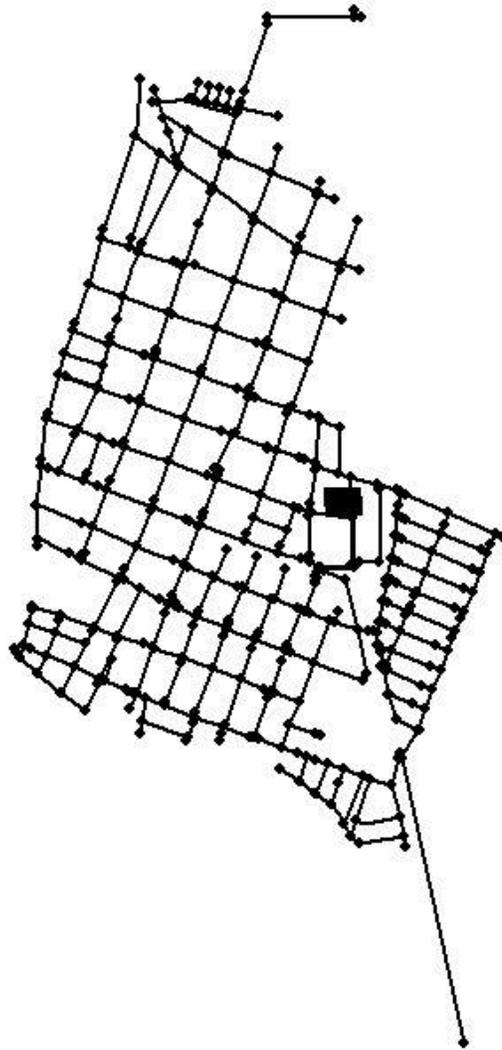


Figura 12. Red Candelaria.

La red de Candelaria corresponde a la RDAP del municipio de Candelaria, ubicado en el Valle del Cauca, Colombia. Como se observa en la Figura 12, la principal característica de esta red es la presencia de una gran cantidad de circuitos cerrados, lo generalmente se asocia a una mayor confiabilidad. La red está compuesta por dos embalses, ubicados aproximadamente en el centro de la red y por 463 nudos y 567 tuberías que los conectan.

## 5.8 GINEBRA

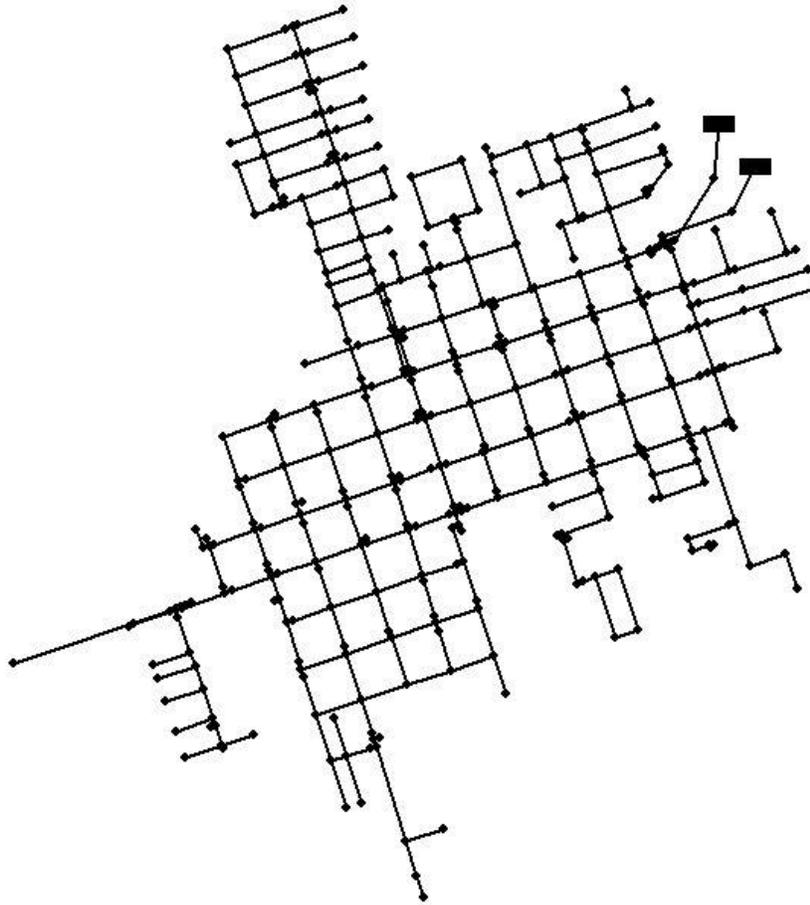


Figura 13. Red Ginebra.

De igual manera que las redes anteriores, la red de Ginebra corresponde a la RDAP de un municipio del Valle del Cauca. Esta red se caracteriza por tener un gran número de circuitos cerrados, principalmente en el centro de la misma y, adicionalmente presenta algunas ramificaciones en sus extremos. Esta red presenta dos embalses, ubicados en la esquina superior derecha de la red y cuenta con 398 nudos y 469 tuberías.

## 5.9 GUACARÍ



Figura 14. Red de Guacarí.

La red de Guacarí cuenta con un embalse, 568 nudos y 656 tuberías. Al igual que las redes anteriores, está se encuentra ubicada en el Valle del Cauca, en este caso en el municipio de Guacarí. Como se observa en la Figura 14, el embalse se encuentra ubicado al extremo derecho de la red, alejado de la gran mayoría de nudos y de circuitos cerrados. El centro de la red se caracteriza por estar compuesto principalmente por loops, o circuitos cerrados, y presenta algunas ramificaciones de proporción considerable que se extienden en diferentes direcciones.

## 5.10 HANOI

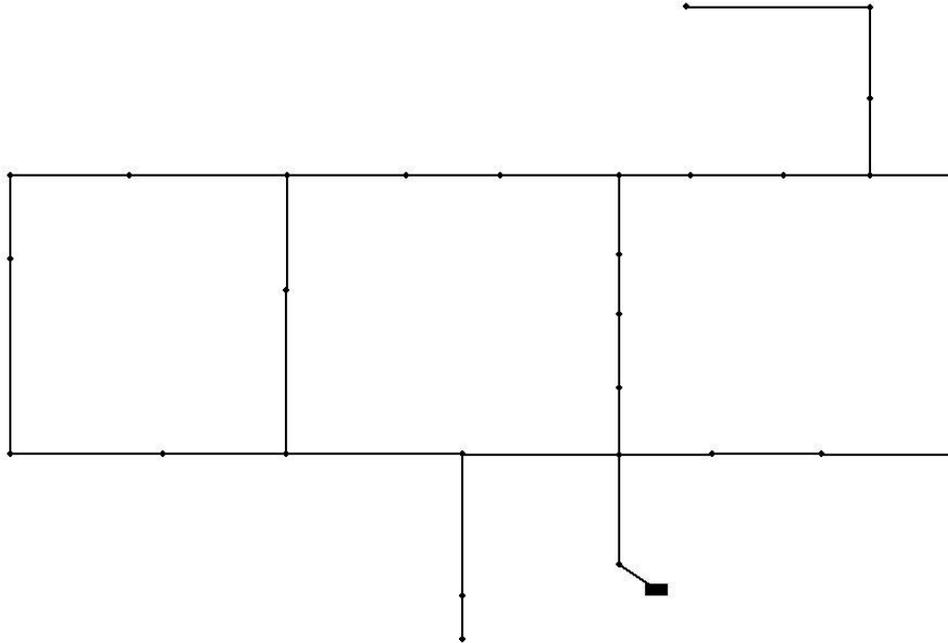


Figura 15. Red Hanoi.

Al igual que la red de Alperovits, Hanoi hace parte del grupo de redes “benchmark” y toma su nombre de la ciudad de Hanoi, capital de Vietnam. Esta red está compuesta básicamente por tres circuitos cerrados y dos ramificaciones pequeñas. Los elementos que conforman esta red son: un embalse, 31 nudos y 34 tuberías que los conectan.

## 5.11 MEDELLÍN

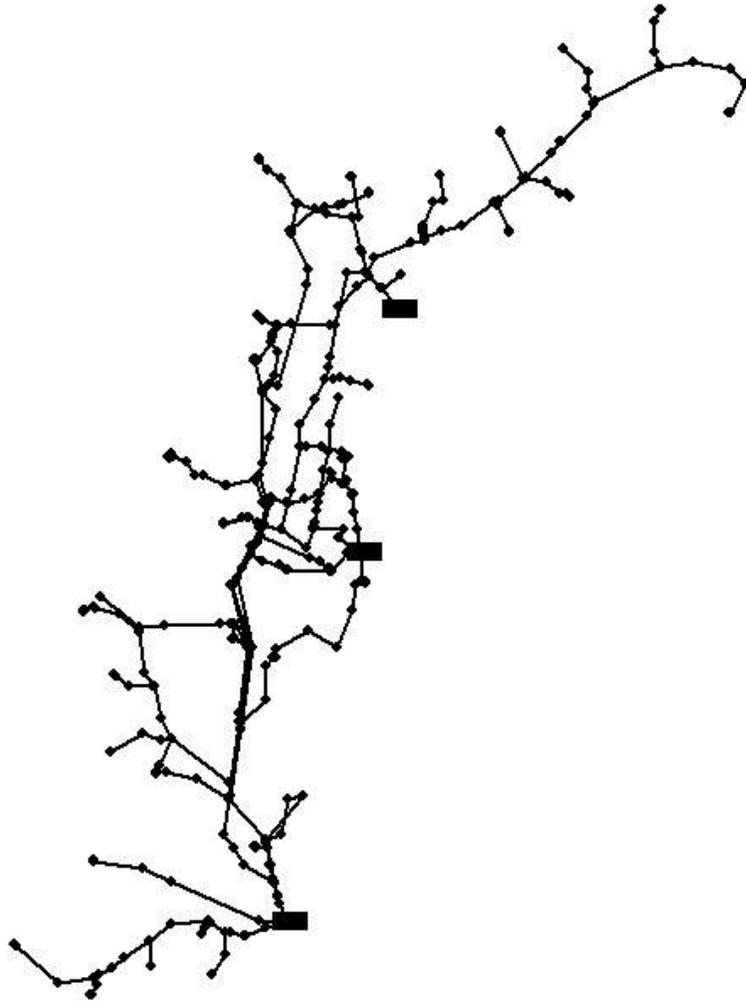


Figura 16. Red de Medellín.

La red de Medellín corresponde a la RDAP de la ciudad con el mismo nombre, que se ubica en el departamento de Antioquia, en Colombia. Como se observa en la Figura 16, la red presenta algunos circuitos cerrados, aunque se caracteriza principalmente por un gran número de ramificaciones. La red cuenta con 3 embalses ubicados uno en la parte superior, uno en el centro y otro en la parte inferior de la red. Adicionalmente cuenta con 684 nudos y 735 tuberías que conectan toda la red.

## 5.12 R28

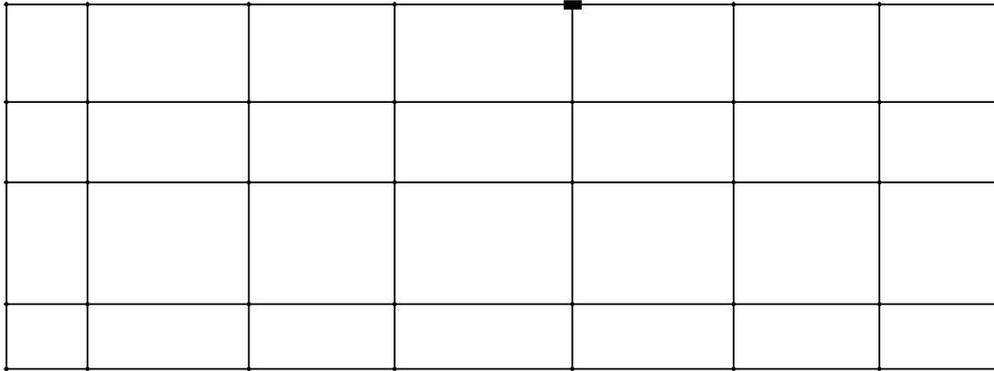


Figura 17. Red R28.

La red R28, al igual que Alperovits y Hanoi, es una red de tipo “benchmark”. Como se observa en la Figura 17, esta red se caracteriza por presentar un gran número de circuitos cerrados conectados entre sí; lo cual, como se mencionó anteriormente, se relaciona directamente con la confiabilidad de la red. Esta RDAP está conformada por un embalse, ubicado en la parte superior y central de la red, 39 nudos y 67 tuberías.

## 5.13 SAN VICENTE

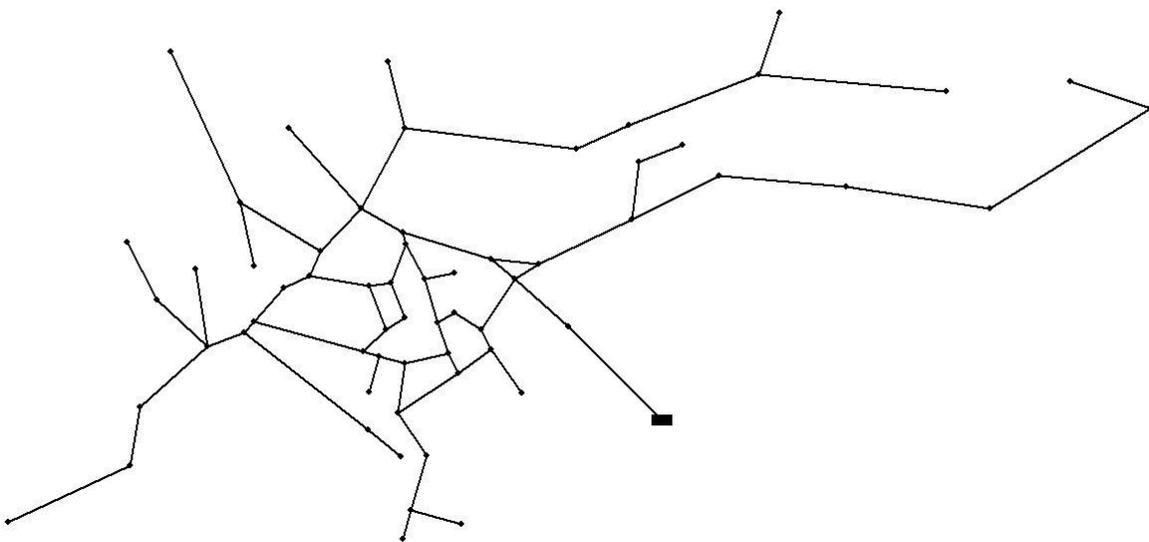


Figura 18. Red de San Vicente.

La última red utilizada fue la del municipio de San Vicente, en el departamento de Antioquia. Esta red, a pesar de tener algunos circuitos cerrados, se caracteriza principalmente por el gran número de ramificaciones que presenta. Dentro de los elementos que conforman la red se encuentran: un embalse, 62 nudos y 71 tuberías.

A continuación se presenta una tabla con las características principales de cada red a manera de resumen.

**Tabla 1. Resumen de las características principales de las redes utilizadas.**

<b>Red</b>	<b>No de Embales</b>	<b>No de Nudos</b>	<b>No de Tuberías</b>
<i>Alperovits</i>	1	6	8
<i>Andalucía Alta</i>	1	329	360
<i>Andalucía Baja</i>	1	358	394
<i>Bogotá-Cazucá</i>	1	145	150
<i>Bolívar</i>	1	283	331
<i>Bugalagrande</i>	1	582	655
<i>Candelaria</i>	2	463	567
<i>Ginebra</i>	2	398	469
<i>Guacarí</i>	1	568	656
<i>Hanoi</i>	1	31	34
<i>Medellín</i>	3	684	735
<i>R28</i>	1	39	67
<i>San Vicente</i>	1	62	71

## 6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones hidráulicas realizadas en cada red. Estos resultados, específicamente, corresponden al valor de cada índice en cada una de las situaciones que se simularon en el programa REDES; adicionalmente se presentan una serie de gráficas en donde se evidencia la relación existente entre los distintos índices. En todas las tablas, la primera fila corresponde a los índices de confiabilidad de la red con todas las tuberías abiertas.

### 6.1 ALPEROVITS

Para la red de Alperovits se encontró que al cerrar la mayor parte de las tuberías se presentaban presiones negativas, lo que representa una falla total del sistema. La presencia de presiones negativas justifica la existencia de valores negativos en índices como el déficit de altura media, el superávit mínimo y el superávit total. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 2. Resultados de la red de Alperovits.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.652	0.456	0	1	0	19.340	157.975	5.701
8	0.652	0.456	0	1	0	19.348	157.952	5.693
7	0	0	7.569	0.760	0.541	-472.324	-339.575	42.613
2	0	0	19.287	0.670	1.378	-884.397	-1657.945	98.482
4	0.634	0.446	0	1	0	18.972	154.220	5.815
5	0	0	60499.475	0.196	4321.391	-1913072.6	-3826114.2	281234.686
6	0	0	3421.185	0.821	244.370	-285913.31	-285801.89	16018.625

Teniendo en cuenta el tamaño de la red y su configuración no fue posible realizar un mayor número de simulaciones; sin embargo, al analizar la red en una condición estable (primera fila), se observa que: el índice de resiliencia de la red presenta valores inferiores a los que presenta el índice de resiliencia normal, lo cual confirma la influencia que tiene la redundancia de los diámetros de las tuberías en la confiabilidad de una red. Adicionalmente se observa que cuando el índice de resiliencia es mayor a cero punto cinco, el índice de falla, la tasa de satisfacción de demanda y el déficit de altura media indican que la red no debería fallar. Debido al tamaño de la red, es decir su número de tuberías, no se obtuvo una cantidad suficiente de datos para analizar adecuadamente y, por ende, extraer conclusiones. A pesar de esto, los datos obtenidos se utilizarán en los siguientes capítulos, en conjunto a los de las demás redes utilizadas.

## 6.2 ANDALUCÍA ALTA

En la Tabla 3 se observan los resultados para Andalucía Alta. Para esta red se obtuvieron índices de resiliencia considerablemente altos, con algunas excepciones que se pueden explicar como casos en donde la red fallo por la presencia de presiones negativas.

**Tabla 3. Resultados de Andalucía Alta.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.827	0.780	0	0.9995	0	-3.0980	5574.067	0.598
119-185	0.820	0.774	0	0.9995	0	-3.0980	5528.584	0.604
55-63	0.488	0.458	0.000396	0.9440	6.01E-06	-3.0980	3487.218	0.701
140-157	0.820	0.774	0	0.9995	0	-3.0981	5534.418	0.593
115-1007	0.771	0.726	0	0.9914	0	-3.0981	5107.889	0.621
235	0.820	0.773	0	0.9995	0	-3.0981	5527.394	0.595
86-131	0	0	1	0	0.01519	-15	-4934.980	0
103-283	0.827	0.780	0	0.9995	0	-3.0981	5572.563	0.598
148	0.793	0.748	0	0.9995	0	-3.0981	5356.822	0.586
152-268	0.652	0.615	0	0.9989	0	-3.0981	4510.043	0.664
127-161	0.819	0.773	0	0.9995	0	-3.0981	5519.105	0.598
55	0.639	0.602	0	0.9994	0	-3.0981	4406.207	0.673
138	0.817	0.771	0	0.9995	0	-3.0981	5501.283	0.596
122-180	0.671	0.629	0	0.9968	0	-3.0981	4448.867	0.646
231	0.816	0.769	0	0.9995	0	-3.0981	5477.429	0.603
82-264	0.816	0.769	0	0.9995	0	-3.0981	5489.153	0.599
87	0.826	0.779	0	0.9995	0	-3.0981	5567.051	0.598
129-157	0.817	0.771	0	0.9995	0	-3.0981	5508.640	0.594
54	0.650	0.611	0	0.9995	0	-3.0981	4466.282	0.669
54-139	0	0	1	0	0.01519	-15	-4934.980	0
278	0.827	0.780	0	0.9995	0	-3.0981	5572.299	0.598
78	0.819	0.772	0	0.9995	0	-3.0981	5521.923	0.594
185-227	0.821	0.774	0	0.9995	0	-3.0981	5532.963	0.606
148-187	0.776	0.732	0	0.9995	0	-3.0981	5247.945	0.592
86-148	0.683	0.643	0	0.9995	0	-3.0981	4639.321	0.616
122-264	0.764	0.719	0	0.9968	0	-3.0981	5101.520	0.625
63	0.820	0.773	0	0.9995	0	-3.0981	5531.060	0.594
63-180	0.716	0.673	0	0.9995	0	-3.0981	4796.881	0.609
56-130	0.063	0.055	0.638	0.5909	0.00968	-31.5982	98.453	0.883
109	0.817	0.770	0	0.9995	0	-3.0981	5495.751	0.610
305	0.827	0.780	0	0.9995	0	-3.0980	5574.055	0.598

En la primera columna de la tabla anterior se presentan las tuberías que fueron cerradas en cada simulación. Cada fila asociada a un grupo de tuberías cerradas, corresponde a los índices de confiabilidad calculados para esa situación en la red. Como se mencionó anteriormente, los resultados de la tabla permiten afirmar que la red, en prácticamente todos los casos, presento una confiabilidad relativamente alta. Únicamente los cierres de unos grupos de tuberías, principalmente

los cercanos al embalse de la red (fila correspondiente a las tuberías 86-131), presentaron valores inadecuados para todos los índices utilizados. A continuación se presentan una serie de gráficas en las que se comparan diferentes índices.

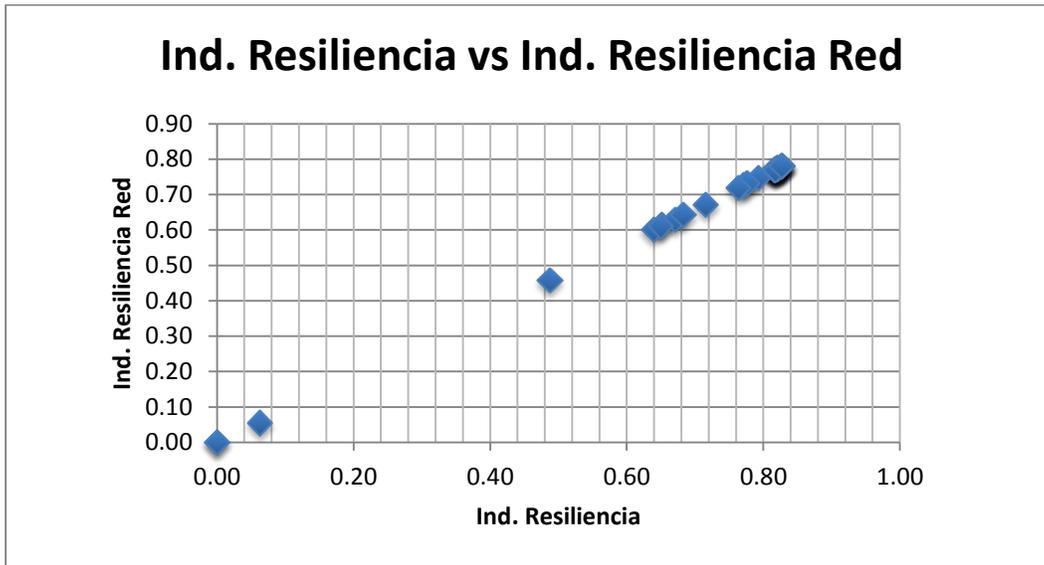


Figura 19. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia.

Al analizar el comportamiento obtenido en la Figura 19, se evidenció la existencia de una relación lineal entre ambos índices. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 3 el índice de resiliencia presentó valores un poco mayores a los del índice de resiliencia de la red.

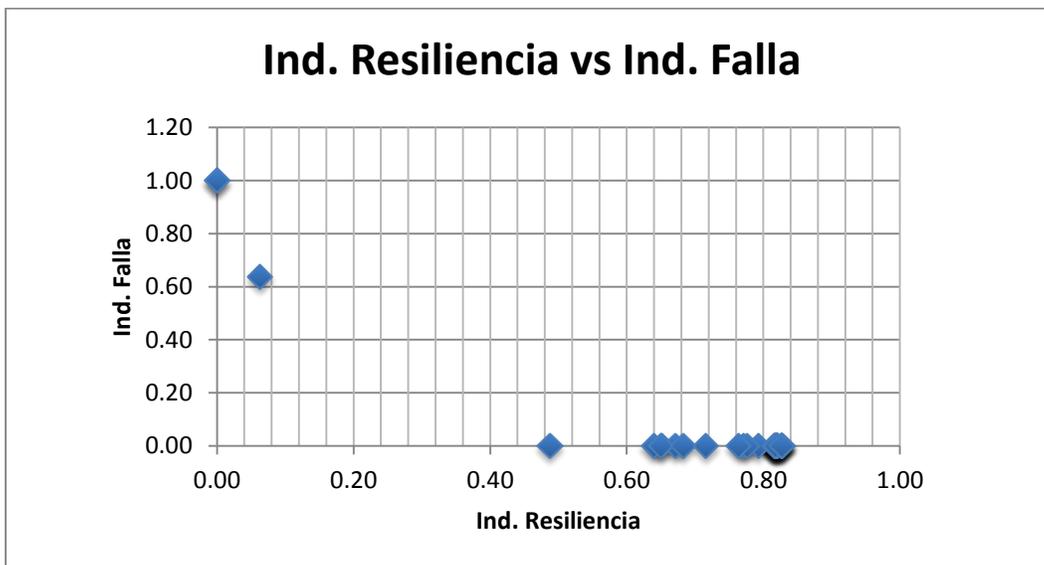


Figura 20. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

En cuanto a la relación entre el índice de resiliencia y el de falla, que se presenta en la Figura 20, en primer lugar es necesario mencionar que la presencia de índices de resiliencia superiores a cero punto cinco garantiza un valor de mínimo para el índice de falla; lo cual confirma la relación entre resiliencia y confiabilidad de una red. En segundo lugar, a pesar de que no existen suficientes datos, se observó que al disminuir considerablemente el índice de resiliencia, el índice de falla se acerca al valor de uno.

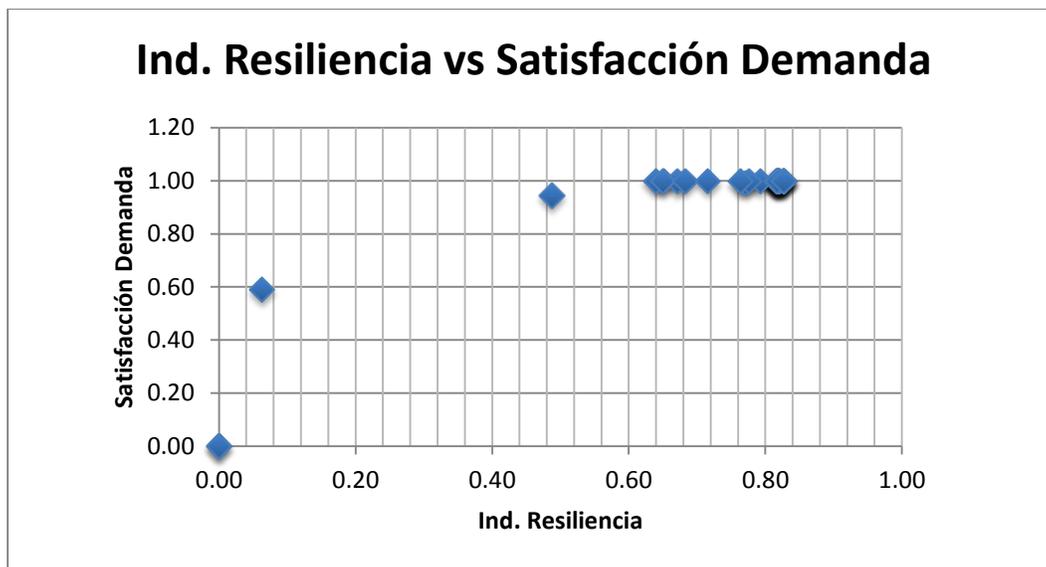


Figura 21. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de la demanda.

Al igual que con el índice de falla, la tasa de satisfacción de demanda presenta una relación directa con el valor del índice de resiliencia, como se observa en la figura anterior. Cuando este es menor a 0.5, la tasa de satisfacción de demanda presenta valores inferiores a 1, lo cual marca una disminución en la confiabilidad de la red. Sin embargo, cuando el índice de resiliencia es mayor a 0.5, la tasa de satisfacción de demanda siempre presenta valores óptimos, es decir 1.

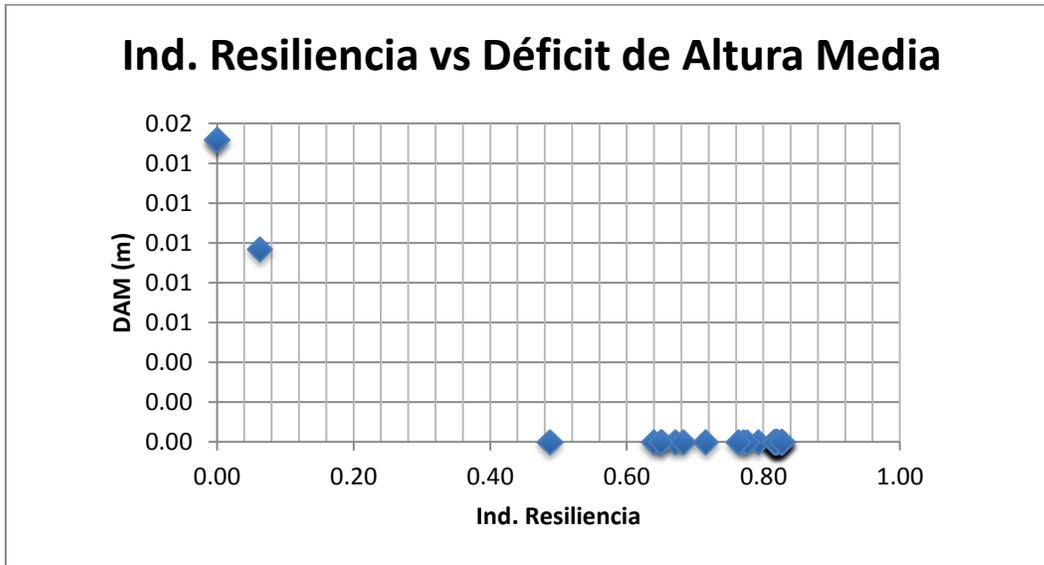


Figura 22. Ind. Resiliencia vs Déficit de altura media.

Como se observa en la Figura 22, la relación entre el índice de resiliencia y el déficit de altura media, presentó un comportamiento similar a lo esperado. Es decir que a medida que aumenta el déficit de presiones en la red el índice de resiliencia presenta valores inferiores a los adecuados. Mientras que cuando no existe déficit alguno el índice de resiliencia siempre presenta valores superiores a 0.5.

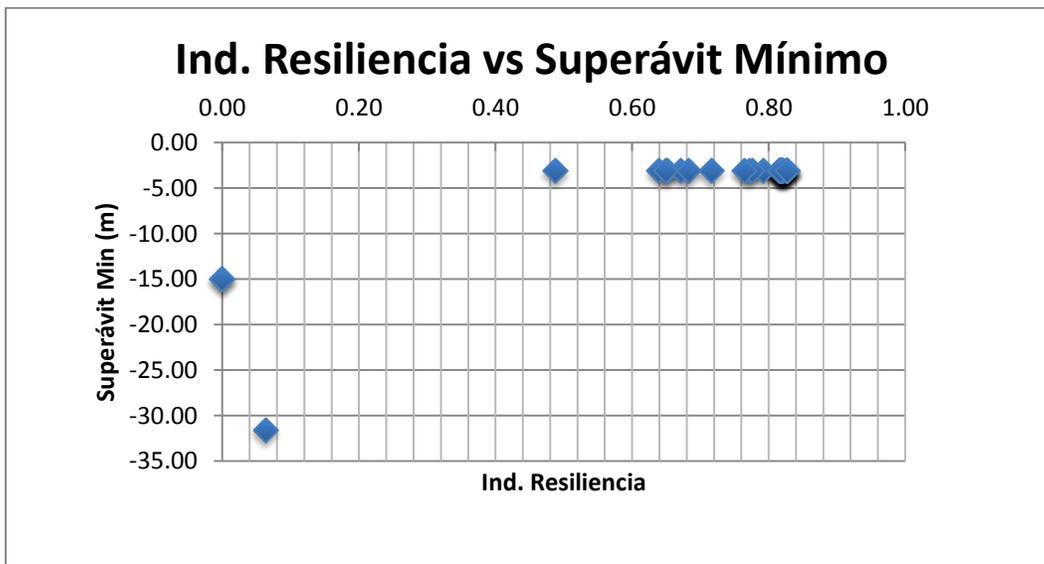


Figura 23. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Al analizar el superávit mínimo versus el índice de resiliencia, en primer lugar es necesario mencionar que la existencia de valores negativos en el superávit no indica que exista una falla en la red, estos valores hacen referencia a la existencia de presiones inferiores a la mínima requerida. Por esta razón, a pesar de que el índice de resiliencia presenta valores superiores a 0.5, existen valores negativos en el superávit mínimo (Mínimum Surplus). Sin embargo, cuando el superávit mínimo disminuye considerablemente, se encuentra cierta relación con la presencia de índices de resiliencia menores a 0.5.

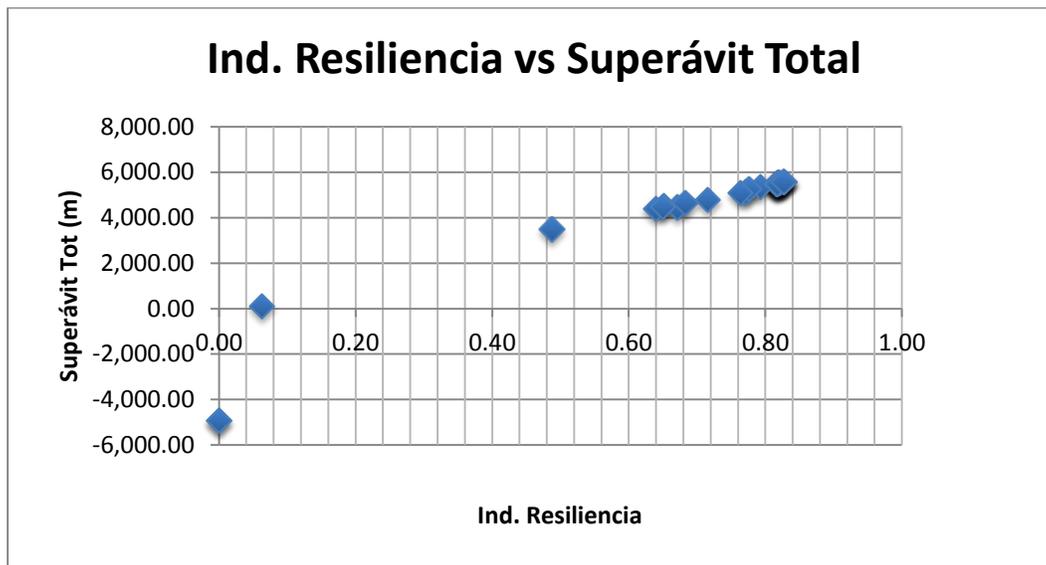


Figura 24. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Al analizar el superávit total de energía (Total Surplus) se encontró que existe una relación prácticamente lineal con el índice de resiliencia. A medida que el superávit aumenta, el índice de resiliencia presenta valores más cercanos a uno, lo cual coincide con lo planteado por Todini al desarrollar el índice de resiliencia. Cuando se encontró un superávit total negativo se presentó el único cero entre los valores del índice de resiliencia.

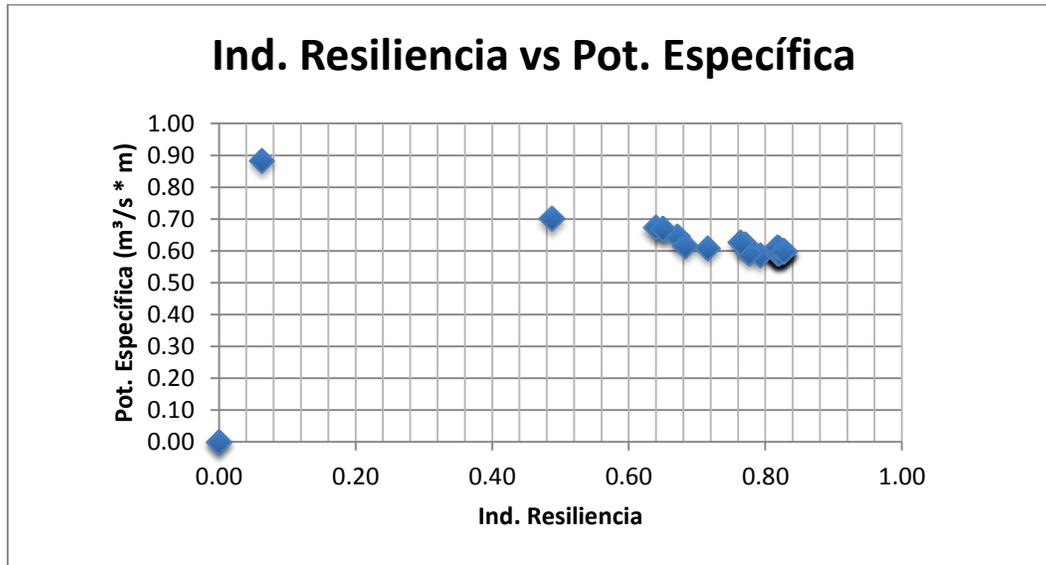


Figura 25. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Al analizar la relación de la potencia específica con el índice de resiliencia, que se presenta en la Figura 25, se encontró una relación inversa, es decir que al aumentar el valor del índice de resiliencia, el valor la potencia específica disminuía. Esta tendencia se presentó en la mayoría de casos; sin embargo, cuando se presentaron presiones negativas, y por ende un índice de resiliencia igual a cero, la relación entre los dos indicadores variaba su comportamiento.

### 6.3 ANDALUCÍA BAJA

A diferencia de la red anterior, para Andalucía Baja se encontró una condición de menor confiabilidad, la cual se refleja en los valores de los índices que se presentan a continuación.

**Tabla 4. Resultados para Andalucía Baja.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.465	0.438	0.056	0.413	0.000872	-14.5	1484.039	0.753
68	0	0	0.056	0.413	0.000872	-14.5	1483.410	0.746
31-138	0	0	0.056	0.413	0.000872	-14.5	1460.667	0.742
29	0.451	0.425	0.056	0.412	0.000872	-14.5	1443.648	0.755
247	0.313	0.292	0.057	0.361	0.000885	-14.5	1120.437	0.751
14-241	0.460	0.434	0.056	0.414	0.000872	-14.5	1466.061	0.752
342-388	0.328	0.307	0.057	0.370	0.000884	-14.5	1146.986	0.750
293-355	0.463	0.436	0.056	0.413	0.000878	-14.5	1482.204	0.753
270-1008	0.174	0.161	0.120	0.358	0.001869	-14.5	1144.014	0.793
9-143-151	0.339	0.319	0.096	0.416	0.001490	-14.5	1374.106	0.732
6-154	0.301	0.282	0.077	0.347	0.001202	-14.8	1229.522	0.736
2-300	0.292	0.273	0.080	0.349	0.001253	-14.5	1228.028	0.742
243-382	0.202	0.189	0.080	0.269	0.001242	-14.5	1044.573	0.755
261	0.283	0.265	0.079	0.328	0.001229	-14.5	1194.709	0.713
147-195	0.463	0.436	0.056	0.412	0.000875	-14.5	1481.943	0.754
306	0.462	0.435	0.057	0.413	0.000882	-14.5	1482.444	0.754
200-306	0.364	0.342	0.066	0.361	0.001031	-14.5	1327.746	0.765
212-273	0.435	0.410	0.060	0.395	0.000932	-14.5	1443.908	0.765
197-227	0	0	0.309	0.221	0.004822	-17.7	65.223	0.871
188-227	0	0	0.192	0.376	0.002998	-14.5	956.208	0.904
290-358	0.455	0.428	0.059	0.413	0.000917	-14.5	1476.673	0.756
195-282	0.457	0.431	0.058	0.412	0.000904	-14.5	1477.053	0.759
11-185	0.449	0.423	0.056	0.409	0.000874	-14.5	1451.453	0.751
201-328	0.195	0.182	0.081	0.268	0.001258	-14.5	1034.637	0.757
12-254	0.379	0.356	0.056	0.374	0.000878	-14.5	1306.572	0.760
254-262	0.042	0.035	0.150	0.355	0.002337	-14.5	961.492	0.853
204-293	0.455	0.429	0.058	0.408	0.000900	-14.5	1472.756	0.759
260	0	0	0.206	0.371	0.003206	-14.5	835.975	0.753
5 - 33	0.291	0.272	0.077	0.348	0.001199	-14.5	1195.947	0.739
304-381	0.019	0.013	0.107	0.207	0.001665	-14.5	708.940	0.728
220-265	0.114	0.104	0.094	0.253	0.001459	-14.5	902.949	0.721

Con respecto al índice de resiliencia, como se puede observar en la Tabla 4, es importante mencionar que, en esta red, no se presentaron valores superiores a 0.5, es decir que según los criterios de Todini, esta red debería considerarse como no confiable.

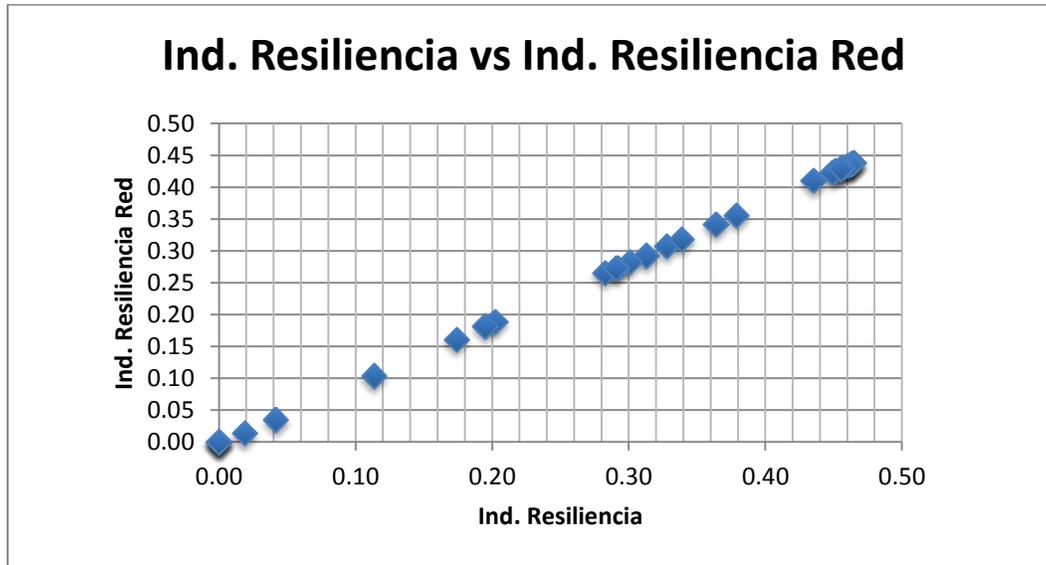


Figura 26. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Similar a las redes anteriores, para Andalucía Baja se encontró una relación lineal entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red. Nuevamente el índice de resiliencia de la red presentó valores levemente inferiores.

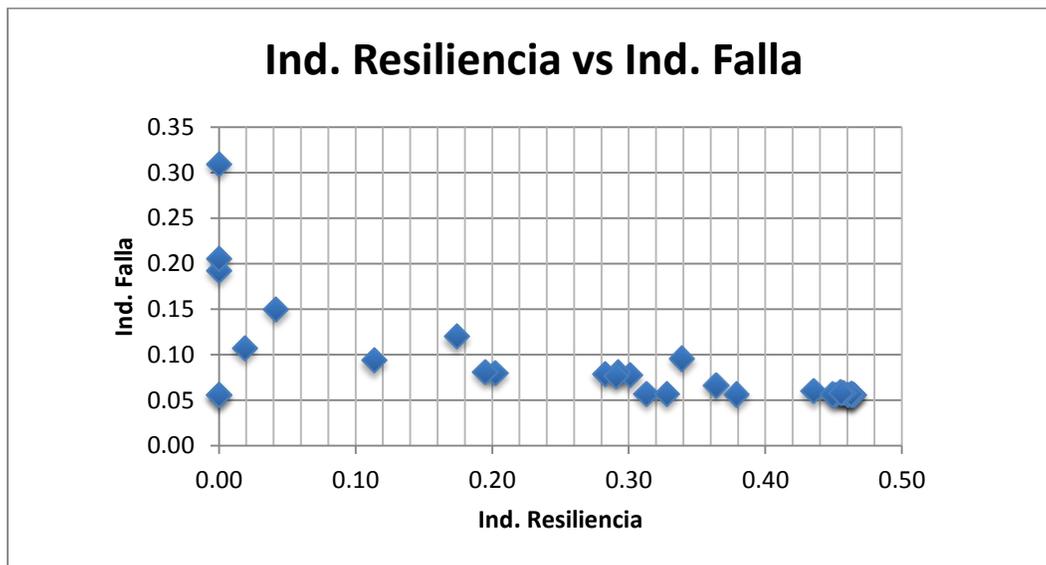


Figura 27. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Como se esperaba, al presentarse valores inferiores a 0.5 para el índice de resiliencia, el índice de falla presentó valores mayores a 0, indicando una disminución en la confiabilidad de la red. La tendencia de los datos encontrados permite observar una cierta relación lineal entre estos dos

índices; sin embargo, cuando el índice de resiliencia resulto ser cero se presentaron diferentes valores para el índice de falla; como se observa en la Figura 27.

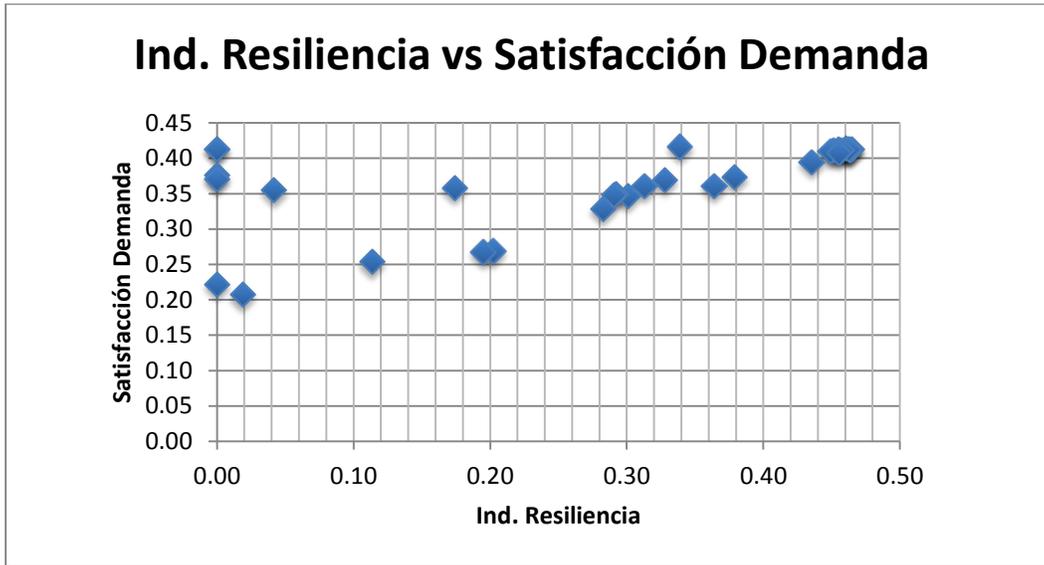


Figura 28. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

El comportamiento de la tasa de satisfacción de demanda fue similar al de la red anterior. En todos los casos se encontraron valores inferiores a uno, lo que coincide con los valores inferiores a cero punto cinco del índice de resiliencia. A pesar de que se puede identificar cierta relación lineal entre estos índices, la dispersión de los datos no permite afirmar que esta sea adecuada.

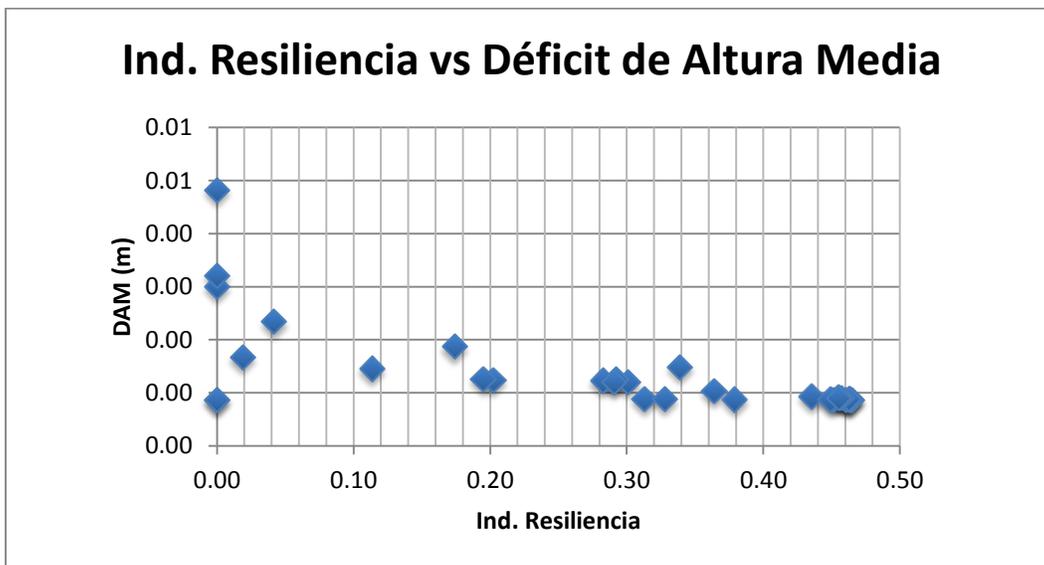


Figura 29. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.



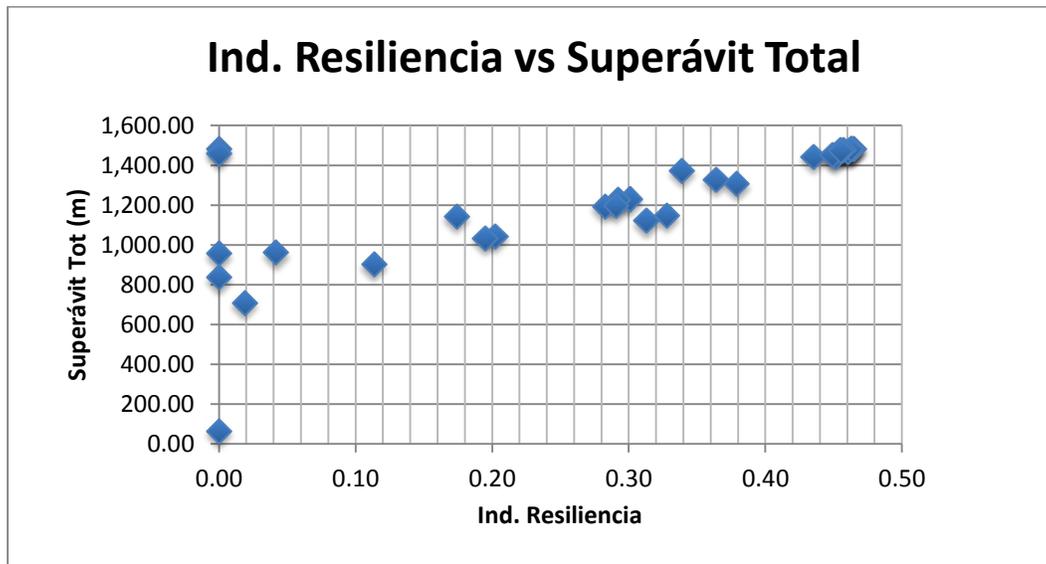


Figura 31. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Al igual que en Andalucía Alta, se encontró que para esta red, la resiliencia tiene una relación lineal con el superávit total de energía, como se puede observar en la Figura 31. Al igual que con el mínimo surplus, cuando el índice de resiliencia es cero, el superávit total presentó diferentes valores que no corresponden con la tendencia.

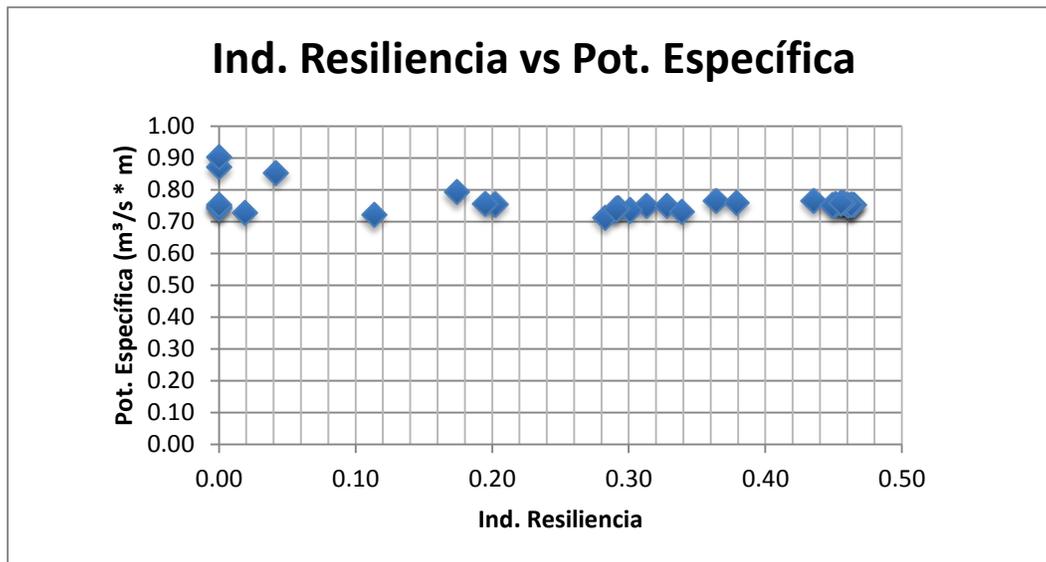


Figura 32. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, al analizar la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica se encontró, nuevamente, una relación lineal. Sin embargo, en este caso la potencia específica presentó una

mayor homogeneidad en las simulaciones, es decir que sus variaciones fueron mucho menores que en las redes anteriores.

## 6.4 BOGOTÁ – CAZUCÁ

Como se esperaba con la red de Bogotá-Cazucá, por tener una configuración con forma de árbol, tanto los valores del índice de resiliencia como de los demás indicadores, permiten afirmar que se trata de una red poco confiable, los resultados se presentan en la Tabla 5. Adicionalmente, es importante mencionar que para esta red, al utilizar el índice de resiliencia modificado, en la mayor parte de las simulaciones se obtuvo cero como valor del índice de resiliencia.

**Tabla 5. Resultados de Bogotá-Cazucá.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Especifica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.338	0.341	0.00073	0.989	3.86E-06	-1.075	5150.043	39.416
130	0.257	0.246	0.245	0.891	1.29E-03	-77.512	2844.694	40.039
33	0	0	7.868	0.552	4.14E-02	-452.564	-20857.958	61.423
72	0	0	6.570	0.590	3.46E-02	-385.574	-24537.268	54.296
62-72-123	0	0	9.584	0.590	5.04E-02	-946.993	-35555.261	61.521
74	0	0	6.570	0.590	3.46E-02	-385.574	-23721.266	54.296
74-57	0	0	6.725	0.590	3.54E-02	-385.574	-23712.979	54.534
70	0	0	6.570	0.590	3.46E-02	-386.091	-25353.271	54.296
70-97	0	0	6.607	0.590	3.48E-02	-386.091	-25466.092	54.498
71	0	0	6.570	0.590	3.46E-02	-385.574	-24945.270	54.296
51-71	0	0	13.087	0.590	6.89E-02	-1496.703	-49979.288	70.311
78	0.342	0.330	0.059	0.923	3.11E-04	-22.862	4943.675	39.640
78-111	0.304	0.291	0.171	0.852	9.02E-04	-60.030	4027.771	40.393
54-78-111	0.299	0.286	0.175	0.833	9.22E-04	-60.030	4112.376	40.384
98	0.104	0.097	1.098	0.701	5.78E-03	-104.572	1074.880	42.368
59-98	0	0	1.806	0.706	9.51E-03	-345.998	-781.418	43.925
108	0	0	2.019	0.578	1.06E-02	-126.994	-3685.883	44.570
108-134	0	0	7.178	0.584	3.78E-02	-437.422	-19850.555	55.225
73	0	0	6.570	0.590	3.46E-02	-385.574	-24129.267	54.296
73-91	0	0	6.574	0.590	3.46E-02	-385.574	-24140.697	54.263
77	0	0	10.569	0.546	5.56E-02	-525.302	-31869.763	64.527
89-123	0.332	0.319	0.094	0.963	4.94E-04	-63.669	4736.150	39.609
51-94	0	0	6.338	0.914	3.34E-02	-1304.824	-19883.325	55.434

A continuación se presentan las diferentes comparaciones entre el índice de resiliencia y los demás índices utilizados.

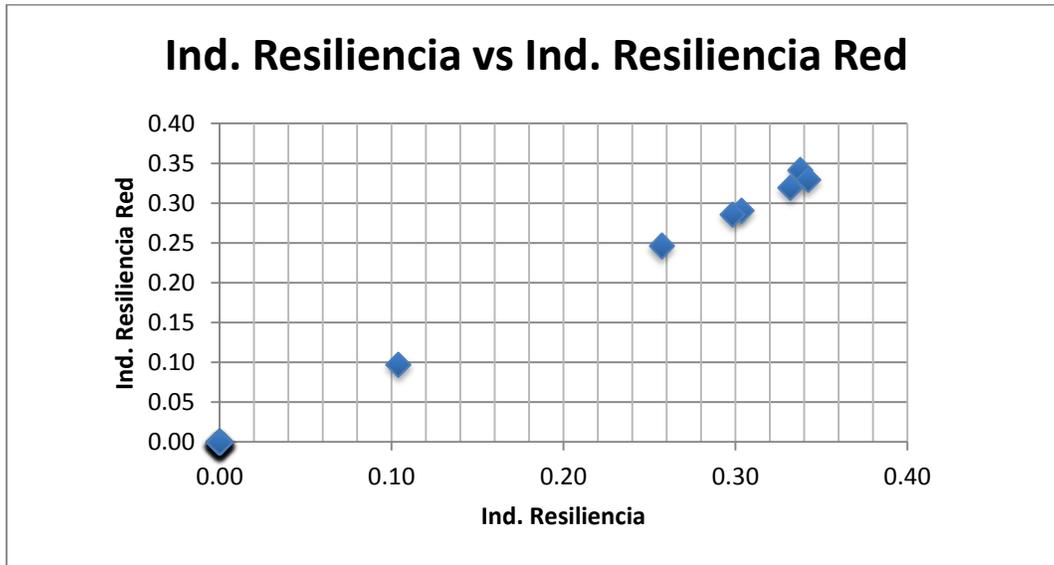


Figura 33. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Al igual que en las redes anteriores la relación entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red puede considerarse como lineal, como se observa en la Figura 33.

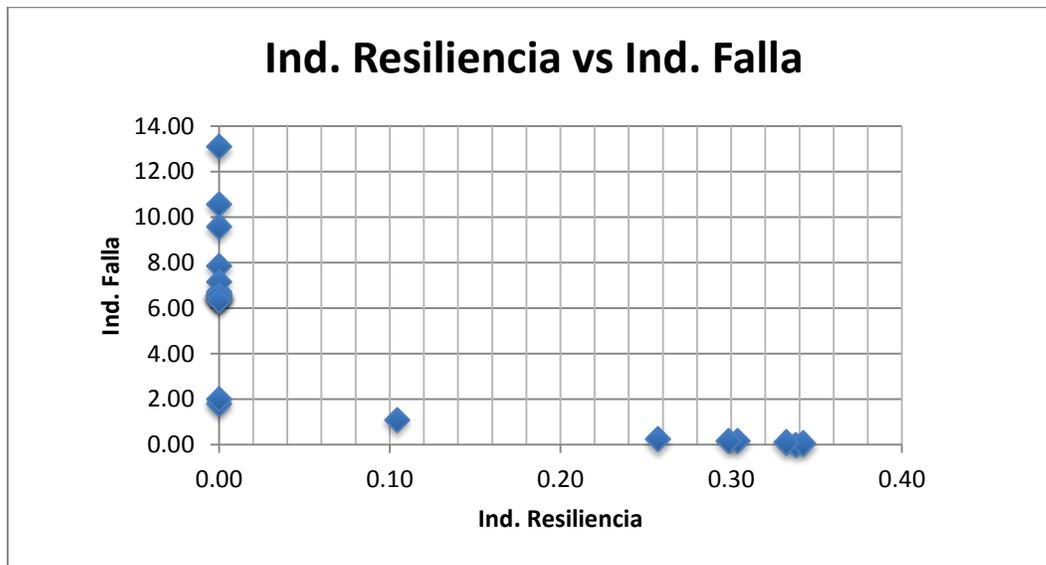


Figura 34. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Al analizar la relación entre el índice de resiliencia y el índice de falla se deben hacer notar varias cosas: en primer lugar es necesario mencionar que, al igual que en los casos anteriores, cuando la resiliencia es menor a cero punto cinco, el índice de falla es mayor a cero. Adicionalmente, cuando el índice de resiliencia es cero, el índice de falla adopta valores muy superiores a uno, lo que puede

estar causado por la presencia de presiones negativas dentro de la red. Esto puede ser confirmado al analizar el superávit mínimo.

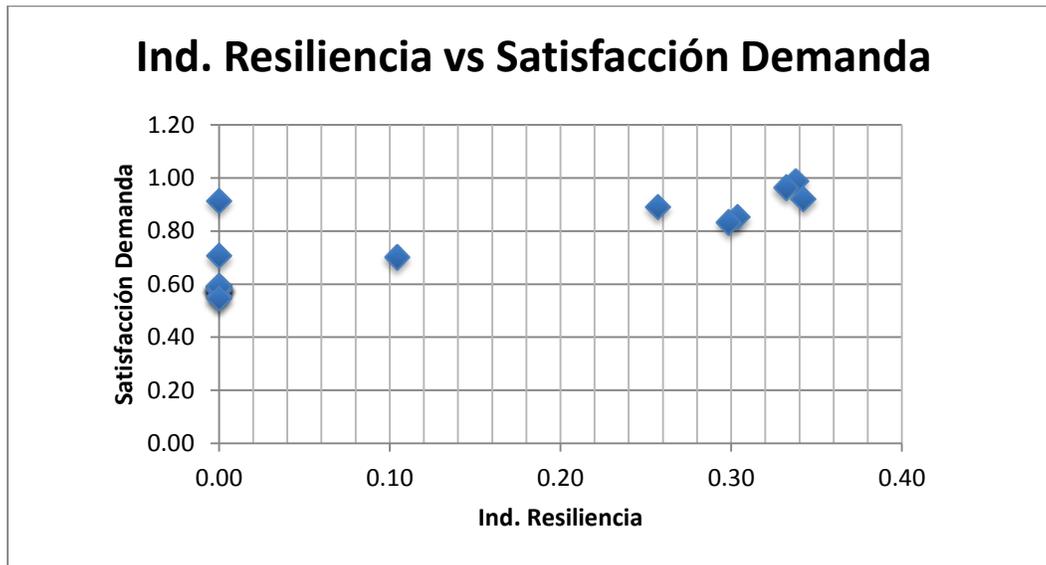


Figura 35. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Para la red de Bogotá-Cazucá se repiten los resultados observados en las redes analizadas previamente. A pesar de que en algunos casos se presentan valores cercanos a uno, cuando el índice de resiliencia es menor a 0.5 la tasa de satisfacción de demanda siempre es menor a uno. Cuando el índice de resiliencia es cero se observa la misma situación encontrada con el índice de falla.

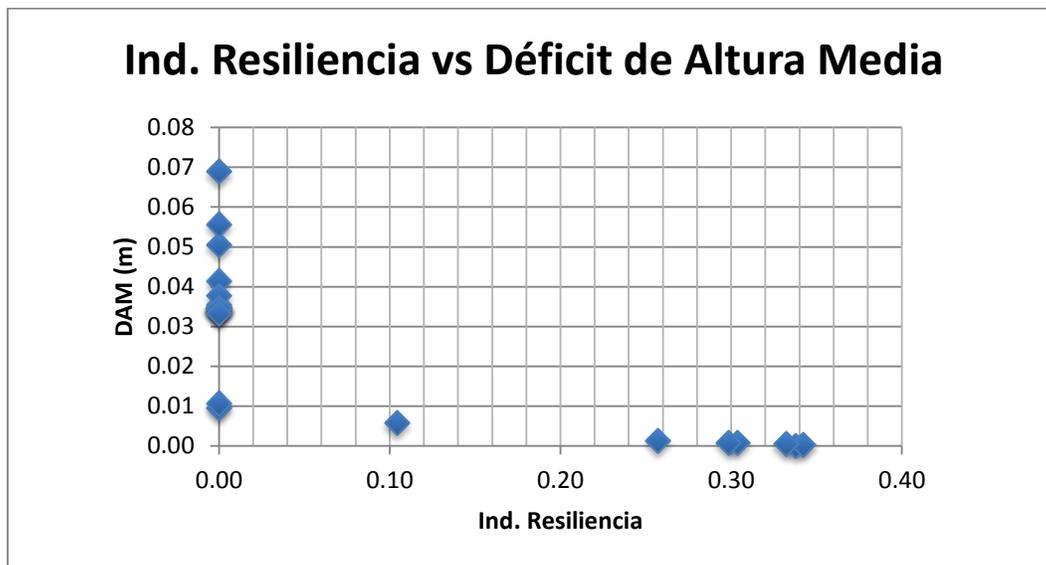


Figura 36. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

Para esta red, en todas las simulaciones se encontró un déficit de presión que aumentó a medida que el índice de resiliencia se acercaba a cero. Esta situación sigue la tendencia de las redes anteriores, en donde siempre que existe un déficit de presión la resiliencia de la red disminuye y el índice de resiliencia es menor a 0.5.

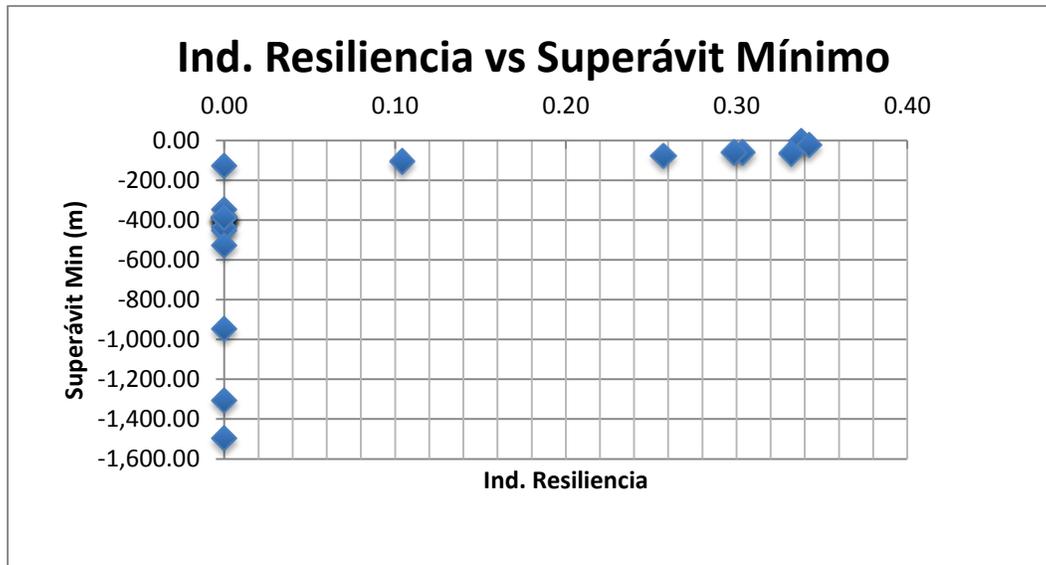


Figura 37. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

A pesar de que la gran cantidad de ceros en los valores del índice de resiliencia no permiten observar una tendencia relevante, la Figura 37 permite observar que el superávit mínimo llega a valores negativos muy altos, lo que representa la presencia de presiones negativas. Esta es la misma tendencia que se presentó con el índice de falla.

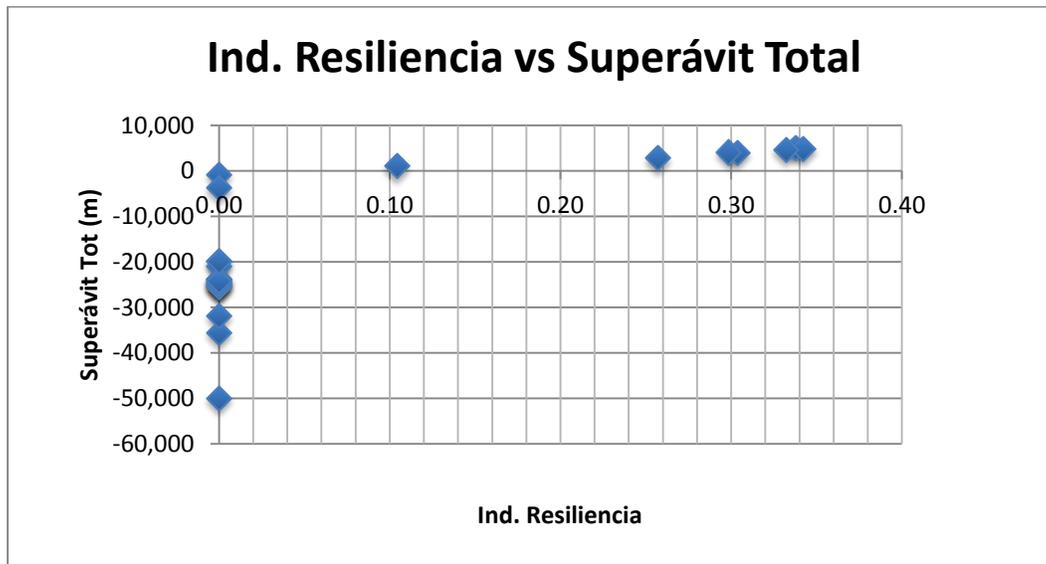


Figura 38. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Al comparar el índice de resiliencia con el superávit total se presenta la misma circunstancia que se describió anteriormente; la presencia de un gran número de ceros como valor del índice de resiliencia no permite concluir acerca de su relación con el total surplus. Sin embargo, en los pocos casos donde este índice no fue cero se observa la misma tendencia lineal que se encontró en las otras redes.

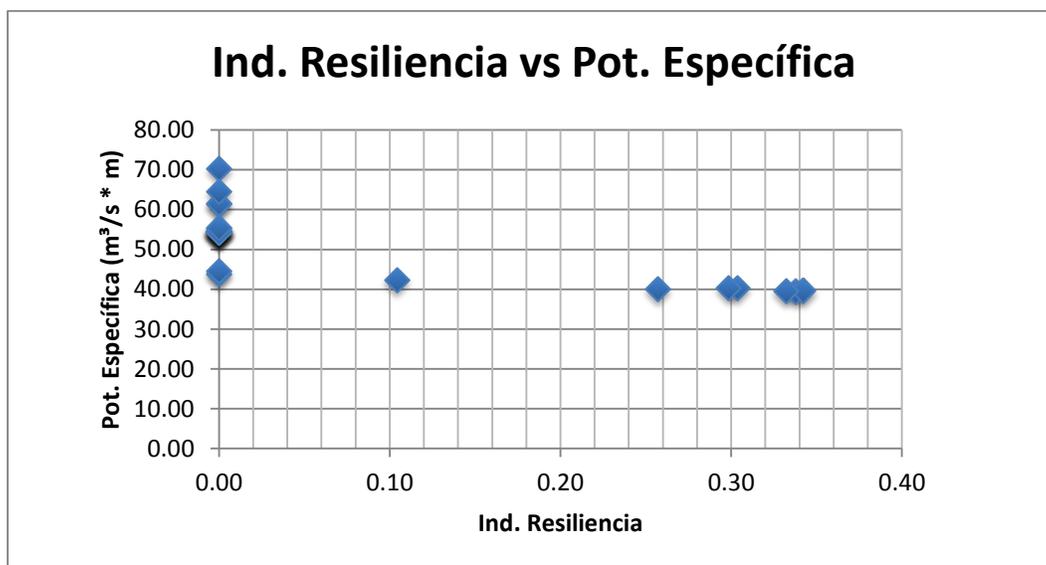


Figura 39. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Po último al analizar la potencia específica versus el índice de resiliencia, Figura 39, en los casos donde la resiliencia no fue cero, se encontró la misma tendencia lineal observada anteriormente.

## 6.5 BOLÍVAR

En la red de Bolívar se presentaron resultados distintos a la tendencia que seguían las redes anteriormente analizadas. En la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos.

**Tabla 6. Resultados para Bolívar.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.837	0.808	0.044	0.947	0.000689	-13.08	3525.531	0.383
11-144	0.743	0.717	0.044	0.945	0.000691	-13.22	3082.153	0.371
146-192	0.612	0.589	0.045	0.943	0.000709	-13.23	2819.990	0.386
147-170	0.747	0.721	0.044	0.945	0.000691	-13.22	3098.289	0.373
137-152	0.725	0.700	0.044	0.942	0.000696	-13.08	2989.264	0.384
60-179	0.829	0.800	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3487.240	0.387
73-166	0.795	0.767	0.044	0.947	0.000692	-13.08	3352.675	0.394
239-300	0.832	0.803	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3504.307	0.381
308-1102	0.739	0.713	0.046	0.945	0.000715	-15.18	3075.668	0.373
51-1100	0.725	0.700	0.051	0.945	0.000803	-15.39	3025.687	0.394
150-276	0.743	0.717	0.045	0.946	0.000703	-13.23	3099.244	0.372
54-321	0.837	0.808	0.044	0.947	0.000689	-13.08	3525.498	0.383
211-264	0.823	0.794	0.044	0.947	0.000691	-13.08	3477.034	0.382
13-181	0.837	0.808	0.044	0.947	0.000689	-13.08	3525.797	0.383
65-80	0.778	0.749	0.044	0.947	0.000686	-13.08	3371.924	0.372
151-263	0.726	0.701	0.044	0.942	0.000696	-13.08	2996.131	0.385
145-204	0.748	0.722	0.044	0.945	0.000691	-13.22	3098.985	0.372
140-233	0.800	0.772	0.044	0.947	0.000692	-13.08	3345.176	0.371
157-273	0.835	0.806	0.044	0.947	0.000689	-13.08	3515.762	0.383
44-57	0.837	0.808	0.044	0.947	0.000689	-13.08	3525.531	0.383
141-152	0.686	0.663	0.045	0.940	0.000698	-13.08	2788.998	0.387
32	0.744	0.718	0.045	0.945	0.000702	-13.26	3094.162	0.368
110-179	0.827	0.798	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3479.324	0.388
191-238	0.812	0.783	0.044	0.947	0.000691	-13.08	3452.890	0.382
178-232	0.790	0.762	0.044	0.946	0.000692	-13.08	3305.816	0.374
105-314	0.836	0.806	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3521.817	0.382
61-200	0.812	0.784	0.044	0.947	0.000692	-13.08	3455.988	0.387
26-269	0.794	0.766	0.044	0.947	0.000695	-13.08	3395.897	0.389
131-167	0.834	0.804	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3518.122	0.382
202-308	0.834	0.805	0.044	0.947	0.000690	-13.08	3516.075	0.385
146-202	0.767	0.741	0.045	0.946	0.000700	-13.23	3168.644	0.370

Con respecto al índice de resiliencia se debe mencionar que en todas las simulaciones se obtuvieron valores superiores a 0.5, es decir que según este criterio la red debería ser considerada resiliente y, por ende, confiable.

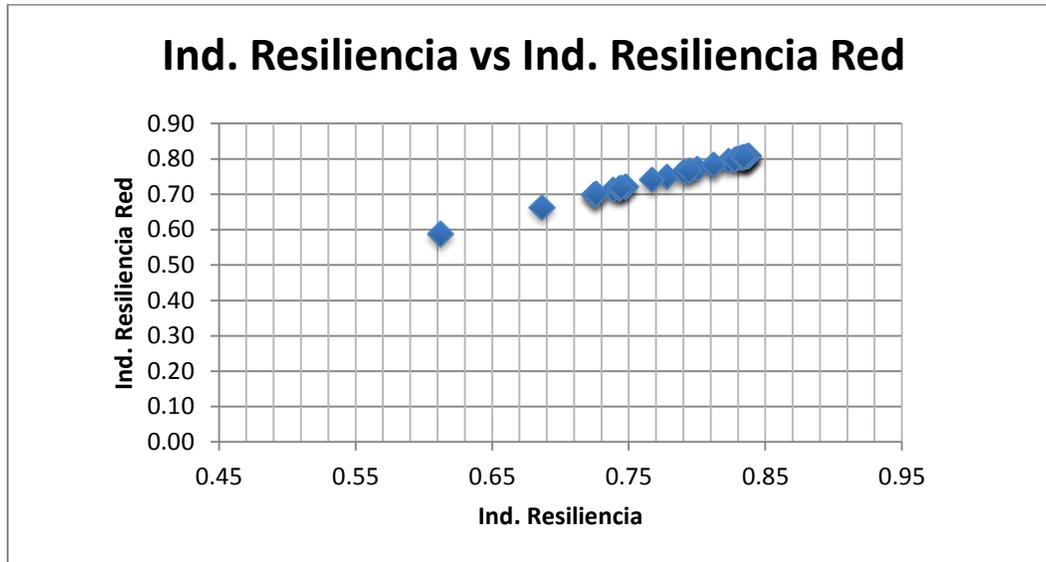


Figura 40. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Al analizar la relación entre en el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red se encontró la misma relación lineal que se ha presentado en las redes anteriores.

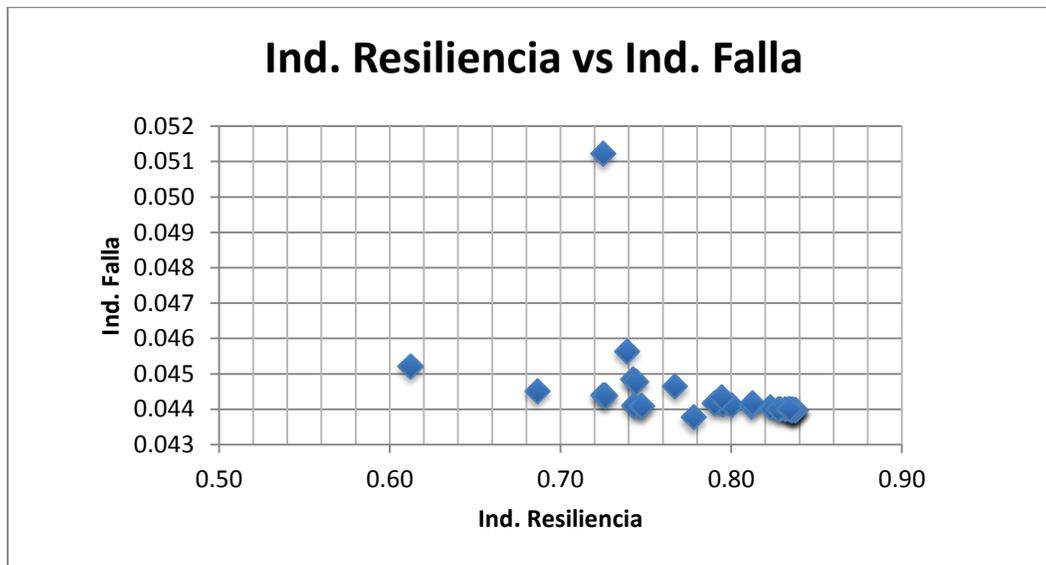


Figura 41. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

A diferencia de las redes anteriores, para la red de Bolívar se encontraron valores mayores a cero para el índice de falla incluso cuando el índice de resiliencia correspondía a valores mayores a 0.5. Esto confirma la diferencia planteada por Todini, entre la confiabilidad y la resiliencia de la red. La

posibilidad de que una red sea resiliente y simultáneamente poco confiable se analizará cuidadosamente en los siguientes capítulos.



Figura 42. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

De manera similar a lo que ocurre con el índice de falla, en la red de Bolívar se encontró una tendencia distinta a la que se venía presentando. En este caso, a pesar de que los valores del índice de resiliencia fueron considerablemente altos, la tasa de satisfacción de demanda presentó valores inferiores al óptimo. Lo cual nuevamente refleja la diferencia que existe entre confiabilidad y resiliencia de una red.

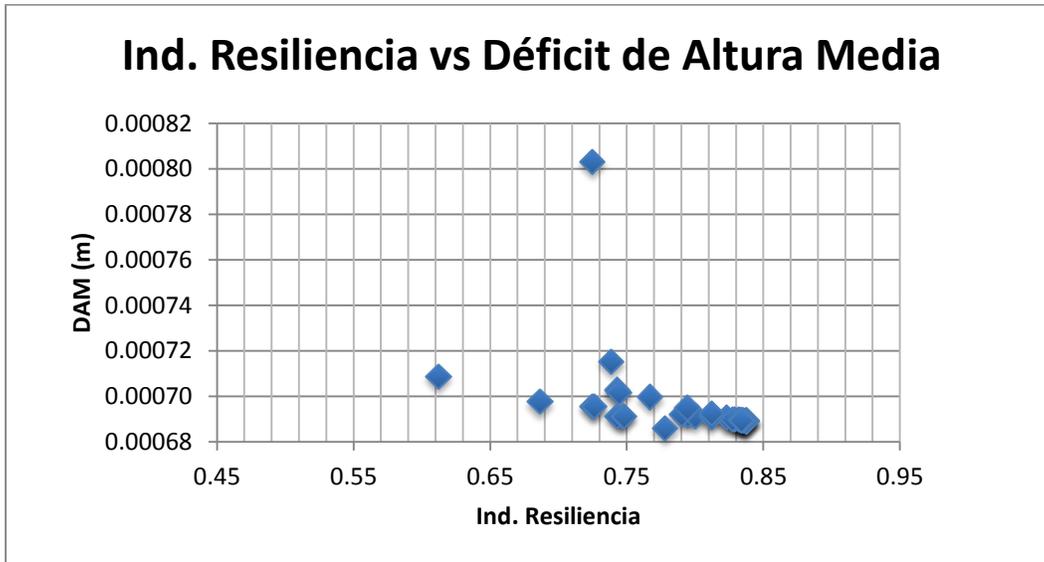


Figura 43. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

A diferencia de las redes anteriores, en donde la existencia de un déficit de presiones se relacionaba con índices de resiliencia menores a 0.5, para Bolívar se encontraron índices de resiliencia mayores a este valor incluso con un déficit de presiones en la red.

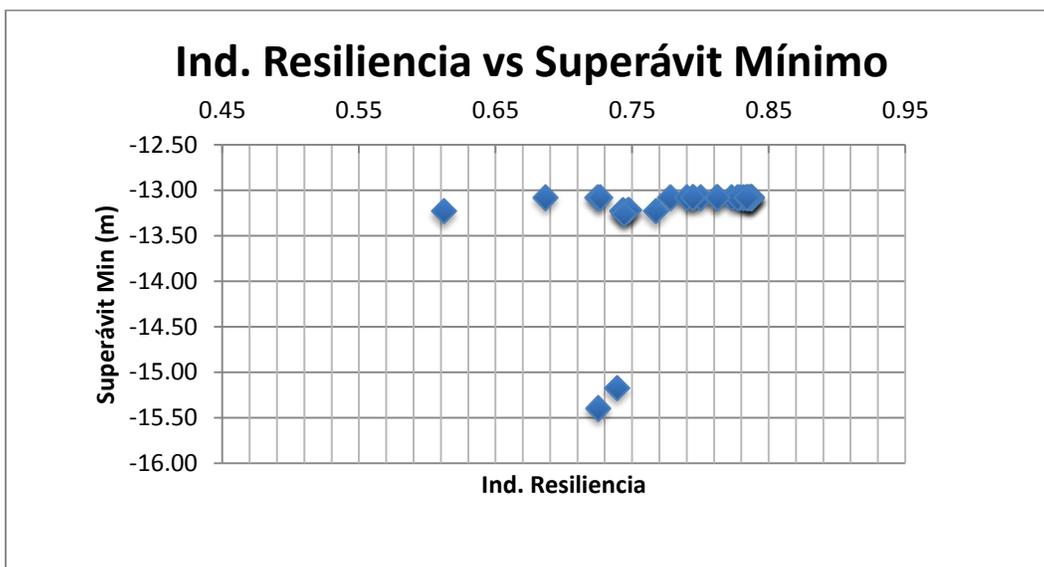


Figura 44. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Al igual que con los indicadores anteriores, el superávit mínimo presentó un comportamiento distinto al de las redes anteriormente analizadas. Sin embargo, en este caso la homogeneidad del

superávit puede corresponder a un único nudo que presenta una presión considerablemente baja, como se observó en la red de Andalucía Baja. Esta relación se puede observar en la Figura 44.

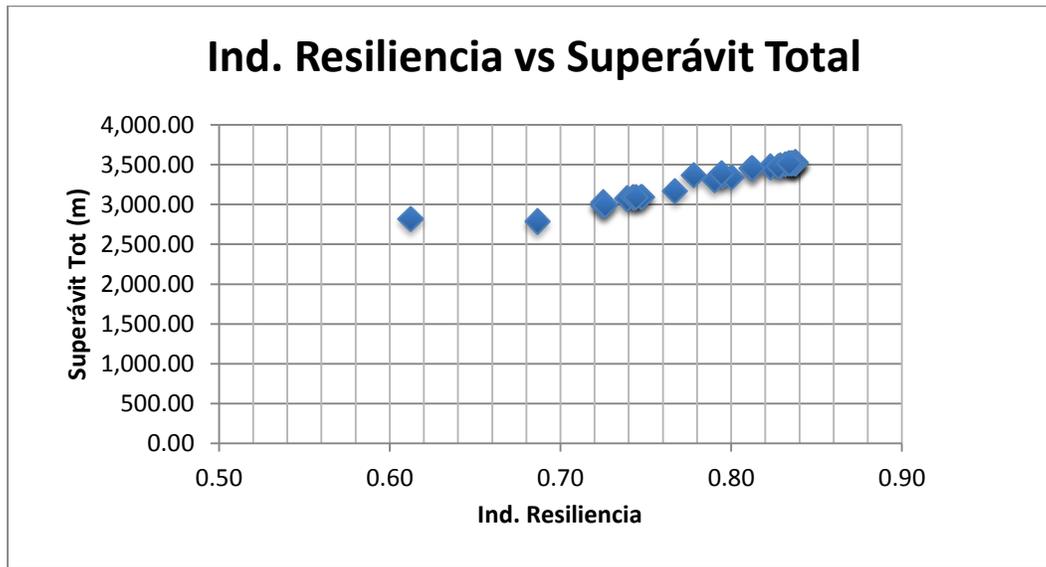


Figura 45. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Para el caso del superávit total se mantuvo la tendencia encontrada en las redes previas. Es decir que se encontró una relación lineal entre este superávit y el índice de resiliencia; a medida que se aumenta el superávit de energía de una red aumenta su resiliencia.

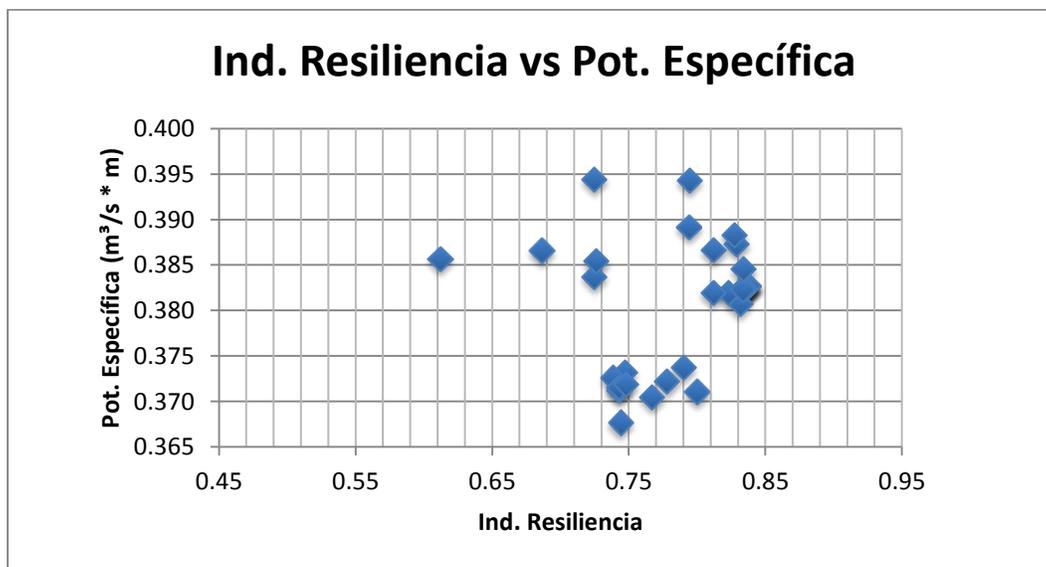


Figura 46. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

En cuanto a la potencia específica, en esta red no se encontró una relación lineal con el índice de resiliencia. Sin embargo, a pesar de que la dispersión de los puntos de la Figura 46 pareciera marcar cambios bruscos de potencia, realmente se encontró que la potencia varía levemente incluso con cambios considerables en la resiliencia de la red.

## 6.6 BUGALAGRANDE

En la red de Bugalagrande nuevamente se encontraron variaciones en las relaciones previamente descritas. A pesar de que se obtuvieron índices de resiliencia considerablemente bajos, algunos indicadores presentaron resultados positivos en cuanto a la confiabilidad de la red. En la Tabla 7 se presentan los resultados.

**Tabla 7. Resultados de Bugalagrande.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5768.45	0.991
67	0.000	0.000	0.154	0.204	0.002	-8.47	-443.58	1.243
211-418	0.301	0.289	0.007	0.973	0.000	-12.15	4995.54	1.056
95-487	0.352	0.338	0.000	0.999	0.000	3.43	5874.68	0.965
95-556	0.289	0.278	0.000	0.952	0.000	1.62	4742.81	1.154
403-580	0.336	0.323	0.000	0.998	0.000	1.03	5628.27	1.015
260-452	0.097	0.095	0.283	0.610	0.004	-14.52	770.03	1.152
381-524	0.289	0.279	0.000	0.960	0.000	-1.25	4536.79	1.176
150-263	0.349	0.336	0.000	0.999	0.000	3.65	5751.46	0.996
301-543	0.347	0.333	0.000	0.998	0.000	1.47	5715.48	0.984
477-504	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5764.77	0.992
94-318	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5772.51	1.015
266-414	0.349	0.335	0.000	0.999	0.000	3.66	5732.86	1.012
243-327	0.348	0.335	0.000	0.999	0.000	3.63	5738.69	0.996
34-289	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5762.20	0.991
123-408	0.347	0.333	0.000	1.000	0.000	3.65	5682.14	1.012
374-575	0.349	0.335	0.000	0.999	0.000	3.66	5746.92	0.991
231-569	0.340	0.327	0.000	0.998	0.000	3.67	5571.70	0.992
215-306	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.67	5766.41	0.991
74-278	0.346	0.333	0.000	0.999	0.000	3.63	5688.09	1.018
16-492	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5764.45	0.991
164-412	0.349	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5749.17	0.980
231-531	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.67	5766.95	0.992
85-648	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5768.50	0.991
124-223	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.67	5765.39	0.991
303-368	0.348	0.335	0.000	0.999	0.000	3.58	5738.73	0.991
94-157	0.350	0.337	0.000	0.999	0.000	3.66	5780.27	1.014
337-485	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5764.89	0.990
293-578	0.350	0.336	0.000	0.999	0.000	3.66	5768.47	0.991
69	0.000	0.000	0.154	0.204	0.002	-8.47	-431.27	1.243

Con respecto al índice de resiliencia, se presentaron valores inferiores a 0.5, lo cual se traduce en una red poco resiliente. Sin embargo, en algunas simulaciones, esto coincidió con valores aceptables de otros índices de confiabilidad utilizados. Este fenómeno confirma nuevamente la diferencia conceptual que existe entre la resiliencia y la confiabilidad de una red y plantea la necesidad de utilizar, no un índice, sino un grupo de índices para evaluar adecuadamente la confiabilidad de una red.

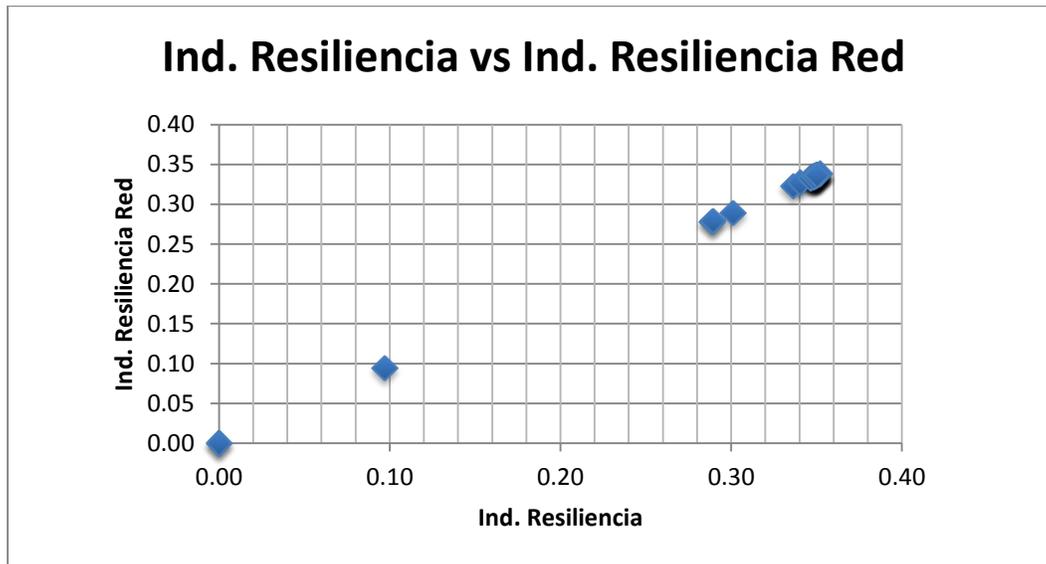


Figura 47. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Al igual que en las redes anteriores, no se presentó ninguna variación en la linealidad existente entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red.

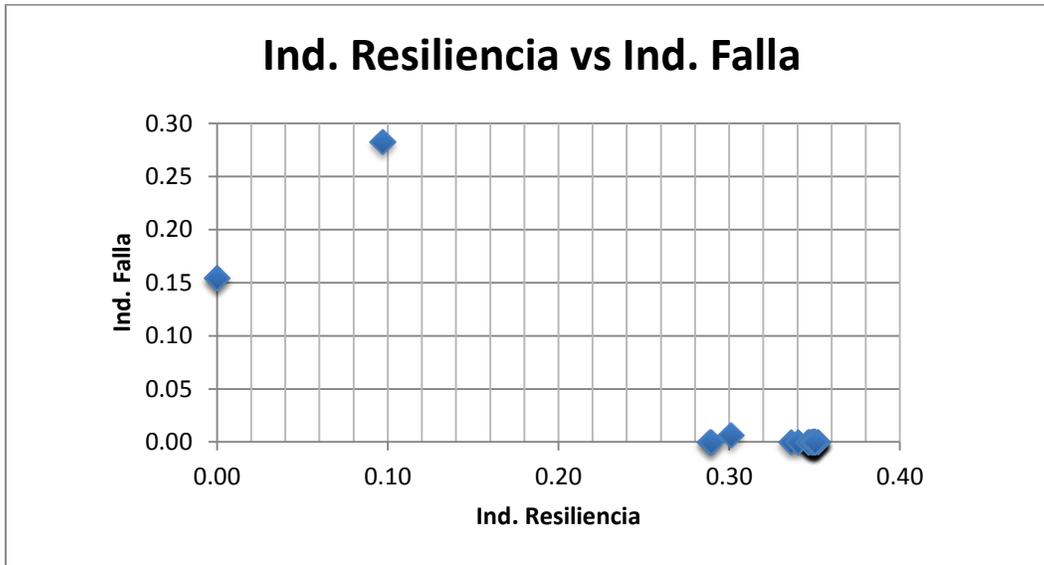


Figura 48. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Como se mencionó anteriormente, a pesar de que se presentaron índices de resiliencia inferiores a 0.5, en algunos casos el índice de falla presentó valores de cero, lo que se traduce en la confiabilidad de la red. Esta variación en la tendencia corresponde a la existencia de valores positivos del *mínimum surplus*; es decir que a pesar de que la resiliencia de la red es considerablemente baja, al no existir ninguna presión inferior a la mínima la red igualmente puede considerarse confiable.

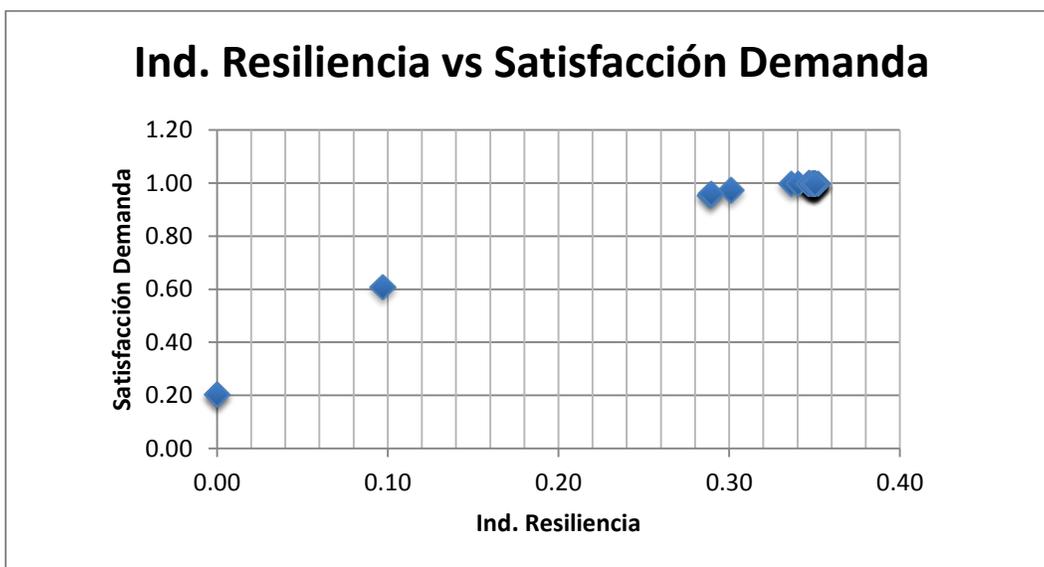


Figura 49. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Al igual que con el índice de falla, para la tasa de satisfacción de demanda se presentaron valores óptimos (iguales a uno) a pesar de la baja resiliencia de la red. Esto se explica de igual manera que en el caso del índice de falla; es decir que la ausencia de presiones menores a la mínima garantiza cierta confiabilidad en una red a pesar de una baja resiliencia.

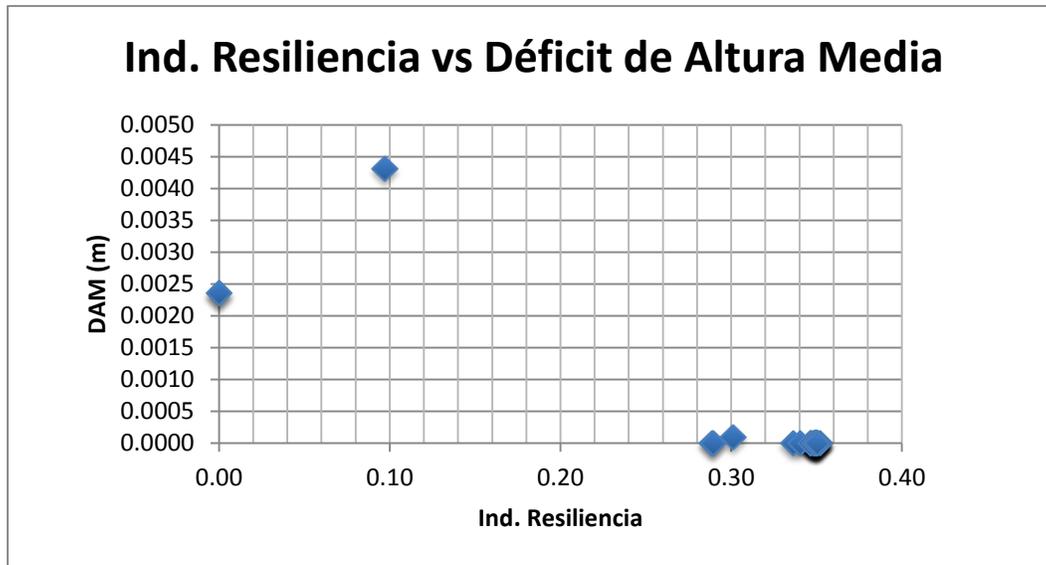


Figura 50. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

A pesar de que la Figura 50 no presenta una tendencia evidente entre el índice de resiliencia y el déficit de presiones de la red, es importante mencionar los puntos que marcan un déficit igual a cero, a pesar de corresponder a índices de resiliencia bajos, coinciden con los puntos encontrados tanto para el índice de falla, como para la satisfacción de la demanda, en donde podría existir cierta confiabilidad a pesar de la baja resiliencia.

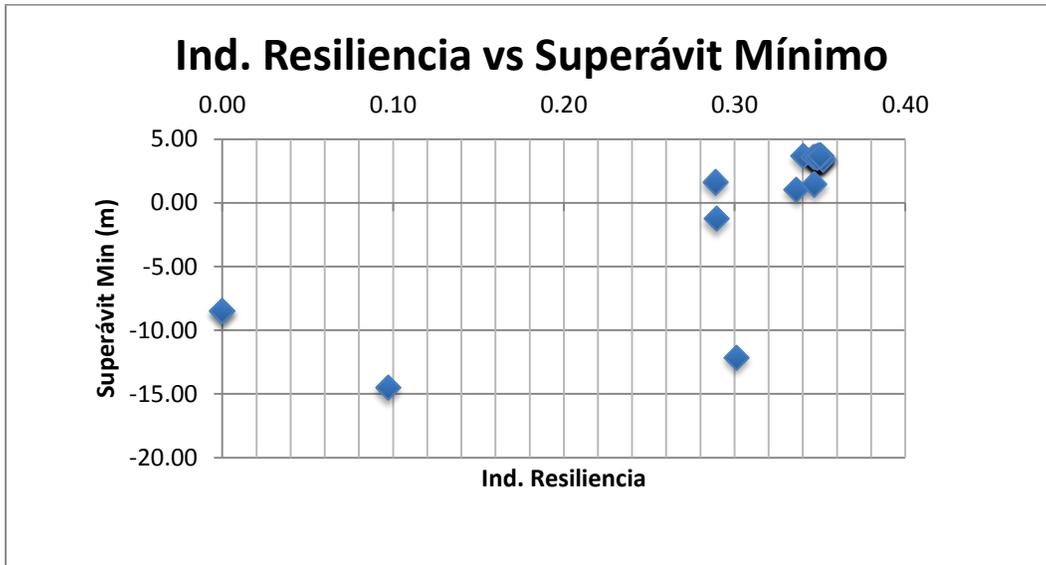


Figura 51. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Como ya se mencionó, la importancia de la Figura 51 radica en la existencia de simulaciones con un superávit mínimo mayor a cero.

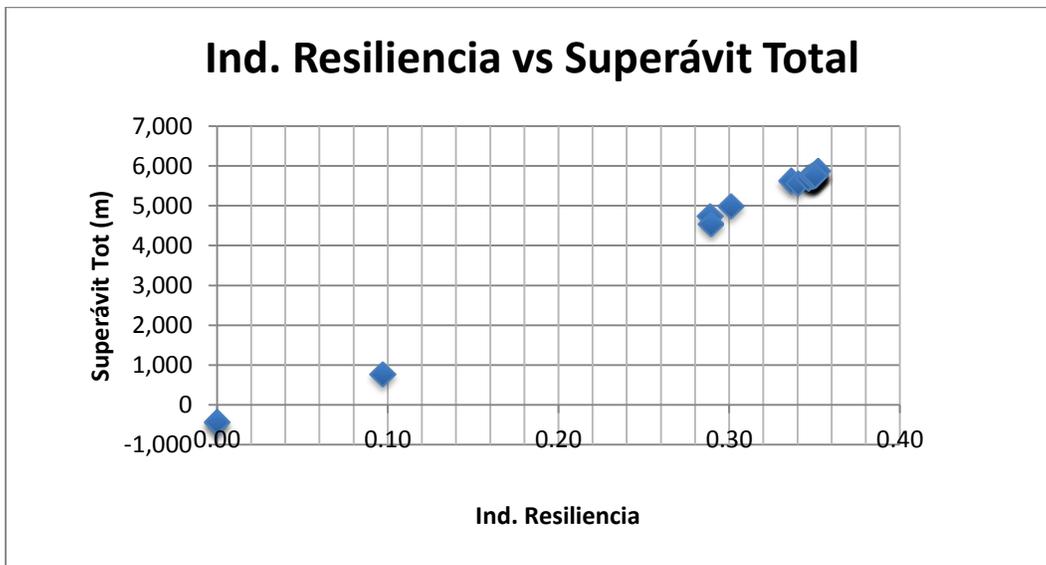


Figura 52. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

En cuanto a la relación entre el índice de resiliencia y el superávit total, no se presentaron variaciones en la tendencia identificada para las redes anteriores. Nuevamente se presentó una relación lineal entre ambos parámetros, como se observa en la Figura 52.

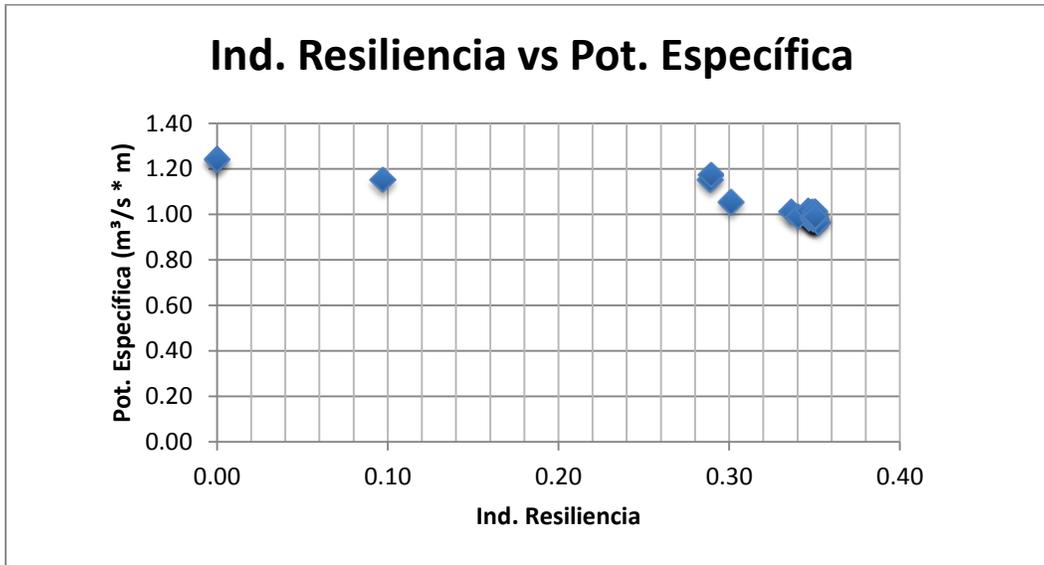


Figura 53. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Para esta red, nuevamente se presentó una relación inversamente proporcional entre el índice de resiliencia y la potencia específica. Es decir que a medida que la resiliencia aumenta en la red, la potencia específica de las tuberías disminuye, lo que se puede entender como un aumento en la homogeneidad de presiones de la red.

## 6.7 CANDELARIA

La red Candelaria presentó un comportamiento similar a las primeras redes estudiadas, pues una alta resiliencia coincidió nuevamente, con una alta confiabilidad según los índices utilizados; en la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 8. Resultados de Candelaria.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.876	0.841	0	1	0	10.852	5748.204	0.130
483-490	0.644	0.619	0	1	0	7.491	4279.860	0.307
93-487	0.864	0.830	0	1	0	10.548	5638.201	0.132
230-433-475	0.654	0.628	0	1	0	6.884	4755.182	0.262
211-242-371	0.859	0.825	0	1	0	10.809	5673.503	0.131
62-489	0.805	0.773	0	1	0	9.200	5271.826	0.145
38-157-217	0.874	0.839	0	1	0	10.860	5742.202	0.128
100-233-238	0.841	0.807	0	1	0	10.534	5607.211	0.154
5-146-492	0.555	0.532	0	1	0	5.938	4022.901	0.333
16-342-366	0.876	0.841	0	1	0	10.850	5747.168	0.130
479-534	0.860	0.826	0	1	0	10.629	5646.719	0.137
112-500-513	0.833	0.800	0	1	0	9.650	5462.057	0.134
290-299	0.867	0.832	0	1	0	10.847	5707.930	0.133
427-459	0.855	0.821	0	1	0	10.302	5648.668	0.125
103-495	0.872	0.838	0	1	0	10.785	5717.090	0.131
239-505	0.833	0.800	0	1	0	10.150	5473.622	0.146
24-156-245	0.872	0.838	0	1	0	10.862	5732.950	0.130
50-211-212	0.868	0.833	0	1	0	10.820	5713.061	0.133
474-477-486	0.359	0.345	0	0.893	0	1.621	3215.113	0.453
489-535	0.807	0.775	0	1	0	9.613	5289.912	0.162
475-483-505	0.581	0.558	0	1	0	6.560	4059.553	0.315
59-277-306	0.874	0.839	0	1	0	10.848	5742.049	0.131
79-339-375	0.857	0.823	0	1	0	10.200	5581.536	0.135
320-346-444	0.874	0.839	0	1	0	10.797	5729.614	0.130
158-177	0.873	0.838	0	1	0	10.877	5739.393	0.130
124-271-297	0.782	0.751	0	1	0	10.048	5349.109	0.189
231-387-395	0.875	0.841	0	1	0	10.817	5745.592	0.131
500-536	0.478	0.458	0	0.996	0	4.538	3177.430	0.395
171-432-468	0.874	0.839	0	1	0	10.751	5744.256	0.130
238-297	0.836	0.802	0	1	0	10.512	5612.585	0.160
324-384	0.856	0.822	0	1	0	10.109	5563.263	0.135

Con respecto al índice de resiliencia se debe mencionar que la mayor parte de las simulaciones presentaron valores superiores a 0.5. Como ya se mencionó, esta red permitió observar nuevamente una relación evidente entre resiliencia y confiabilidad; sin embargo, se observó que esta relación puede estar determinada principalmente por el superávit mínimo de la red.

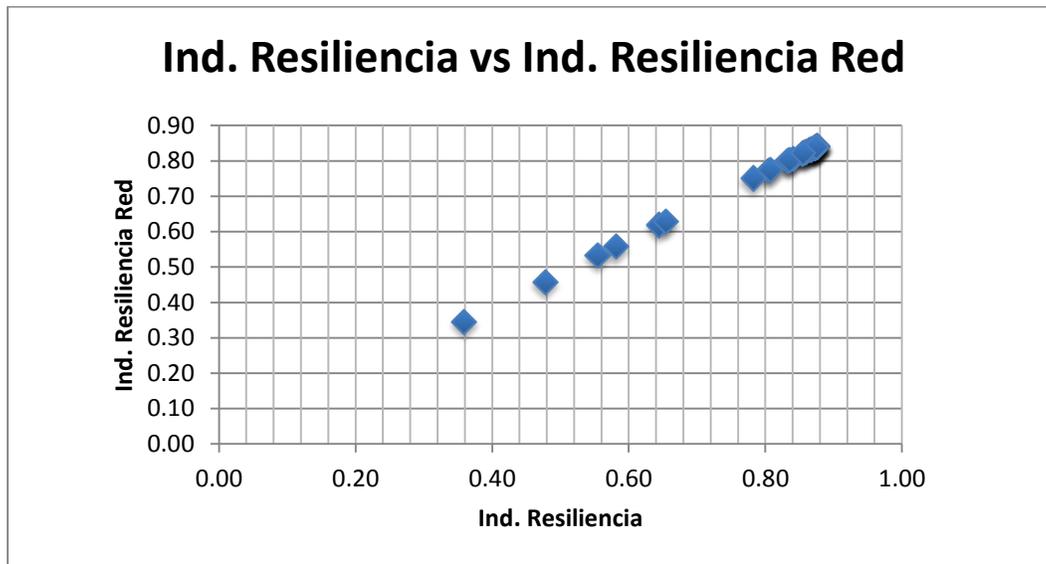


Figura 54. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Como en las redes anteriores, en la Figura 54 se encontró una relación completamente lineal entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red.

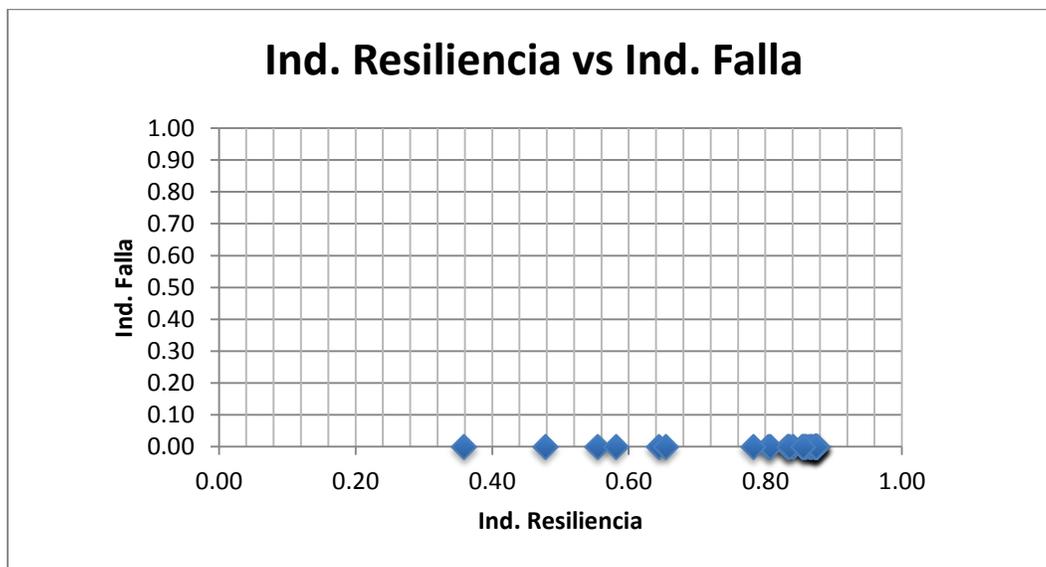


Figura 55. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Acerca del comportamiento del índice de falla versus el índice de resiliencia, en primer lugar se debe mencionar que para todas las simulaciones el índice de falla fue igual a cero, es decir que según este indicador la red es completamente confiable. Esto corresponde a la tendencia esperada, ya que el índice de resiliencia en casi todos los casos presentó valores superiores a 0.5. En el único caso donde

esto no sucedió, el índice de falla igualmente fue cero; esto se puede explicar al observar el superávit mínimo de la red, pues al igual que en la red anterior, este presentó únicamente valores positivos; lo que garantiza la confiabilidad de la red.

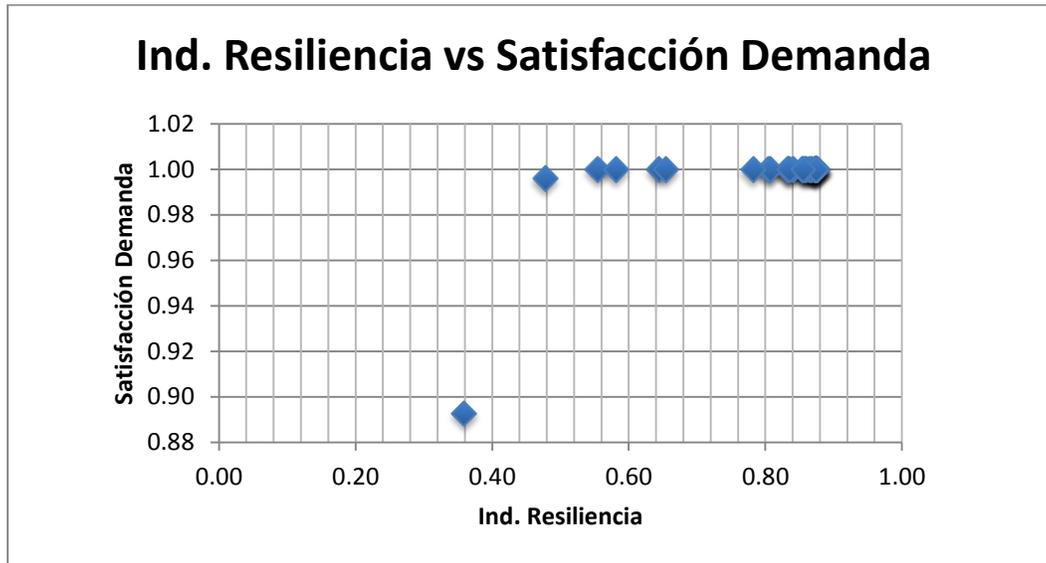


Figura 56. Ind Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Al analizar la tasa de satisfacción de demanda se encontró la misma situación descrita con el índice de falla. Para valores superiores a 0.5 para el índice de falla se tuvieron valores óptimos para la tasa de satisfacción. Sin embargo, para este índice, cuando la resiliencia fue menor a 0.5 sí se presentó una leve disminución la tasa de satisfacción.

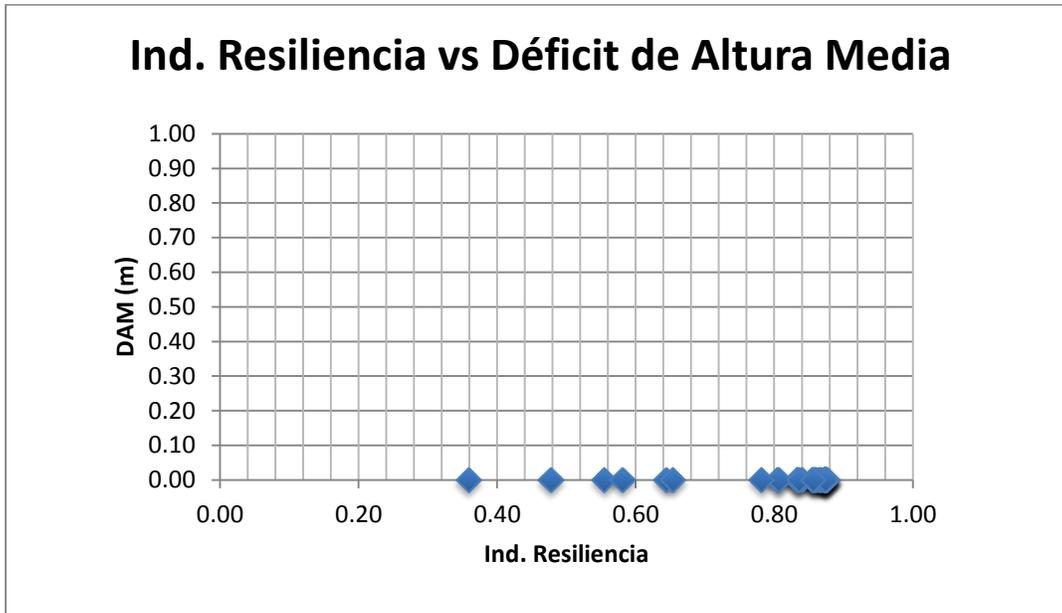


Figura 57. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

En esta red, una condición de alta resiliencia correspondió con la ausencia de un déficit de altura, como se observa en la Figura 57.

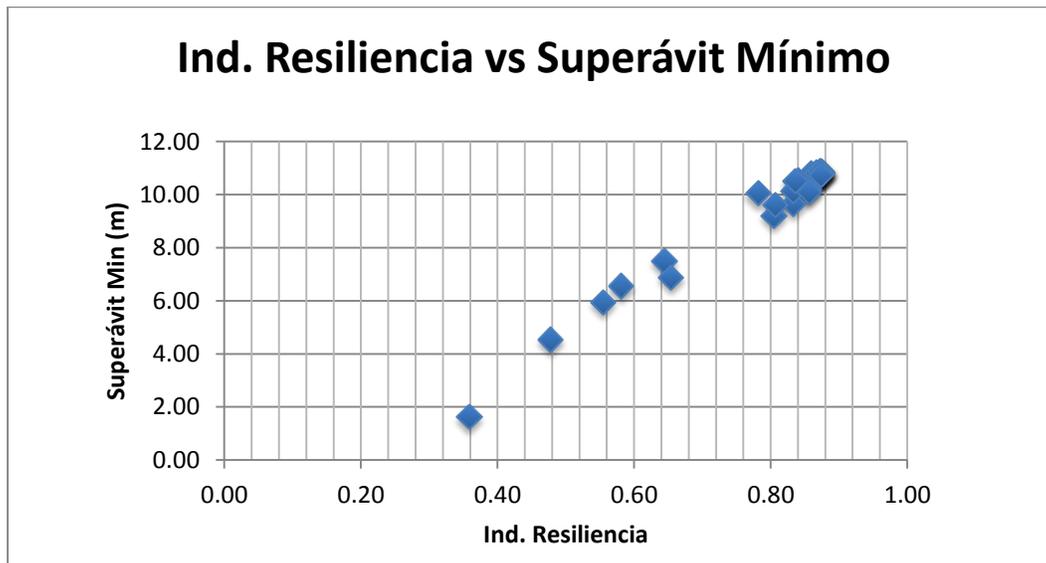


Figura 58. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Al observar el superávit mínimo de la red se encontró que este presentó una relación lineal con el índice de resiliencia. A medida que el superávit aumentaba también lo hacía la resiliencia. Asegurar

un superávit positivo, ratifica la presencia de presión suficiente para suplir la demanda de la red, por lo cual aumenta la confiabilidad de la misma.

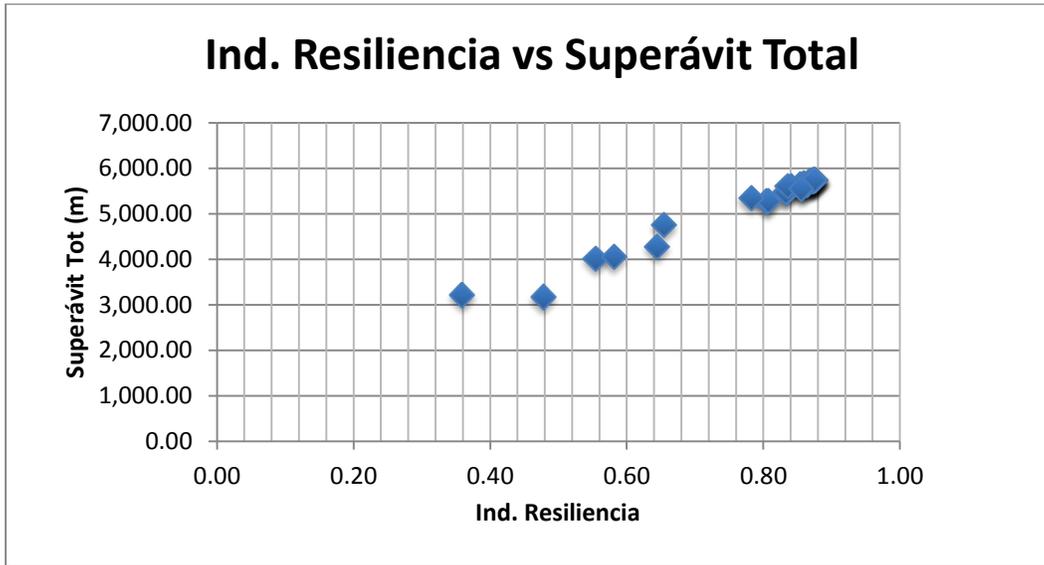


Figura 59. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Como se observa en la Figura 59, la relación entre el índice de resiliencia y el total surplus para esta red es similar a la encontrada en las ya analizadas. Sin embargo, en este caso se presentaron algunas simulaciones que alteraron levemente la linealidad de dicha proporción.

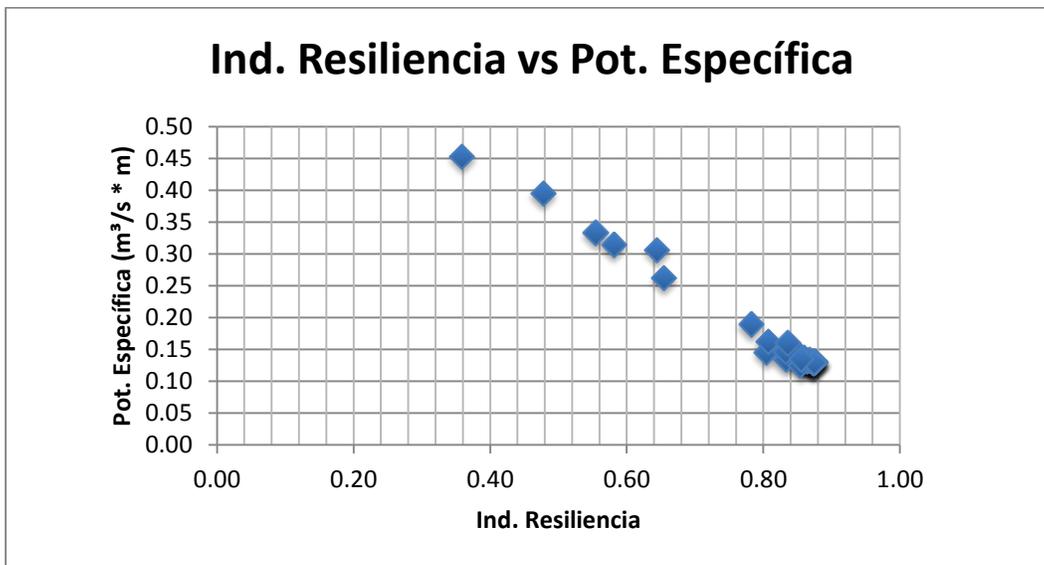


Figura 60. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, en la Figura 60 se observa la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica. Como en el caso anterior, se encontró una proporcionalidad inversa entre estos dos indicadores, es decir que mientras la resiliencia aumenta la potencia disminuye.

## 6.8 GINEBRA

Para la red de Ginebra, al igual que para la de Bolívar, se presentaron casos de alta resiliencia, según el índice de Todini, pero con baja confiabilidad según los otros indicadores. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 9. Resultados de Ginebra.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.881	0.842	0.002	0.619	0.000	-1.195	1763.190	0.124
152-310	0.834	0.798	0.003	0.597	0.000	-1.436	1666.657	0.119
145-154	0.834	0.798	0.003	0.597	0.000	-1.435	1666.997	0.124
46-128	0.665	0.637	0.005	0.519	0.000	-1.764	1323.965	0.115
64-115	0.877	0.838	0.002	0.618	0.000	-1.195	1756.146	0.124
368-455	0.793	0.759	0.004	0.580	0.000	-1.318	1585.024	0.128
126-244	0.778	0.745	0.002	0.578	0.000	-1.219	1553.976	0.123
13-36	0.875	0.836	0.002	0.617	0.000	-1.194	1749.998	0.124
104-274	0.873	0.835	0.002	0.615	0.000	-1.195	1746.049	0.126
82-365	0.865	0.827	0.002	0.613	0.000	-1.251	1731.353	0.126
250-299	0.880	0.841	0.002	0.619	0.000	-1.195	1761.884	0.124
255-401	0.880	0.842	0.002	0.619	0.000	-1.217	1762.867	0.124
85-121	0.748	0.716	0.003	0.569	0.000	-1.195	1492.181	0.123
65-113	0.879	0.841	0.002	0.619	0.000	-1.195	1760.389	0.123
359-406	0.879	0.841	0.002	0.618	0.000	-1.291	1760.642	0.125
175-315	0.880	0.841	0.002	0.619	0.000	-1.195	1761.754	0.124
125-414	0.774	0.740	0.002	0.576	0.000	-1.215	1544.984	0.122
31-34	0.875	0.837	0.002	0.617	0.000	-1.194	1752.037	0.124
114-307	0.874	0.836	0.002	0.617	0.000	-1.195	1751.183	0.123
67-427	0.880	0.841	0.002	0.619	0.000	-1.195	1762.114	0.124
159-355	0.880	0.842	0.002	0.619	0.000	-1.195	1762.485	0.124
50-56	0.881	0.842	0.002	0.619	0.000	-1.195	1763.174	0.124
287-451	0.880	0.842	0.002	0.619	0.000	-1.195	1762.609	0.124
123-425	0.824	0.788	0.002	0.598	0.000	-1.195	1646.163	0.123
264-273	0.875	0.836	0.002	0.615	0.000	-1.195	1748.988	0.127
334-458	0.874	0.836	0.002	0.616	0.000	-1.195	1750.894	0.124
129-262	0.665	0.636	0.007	0.516	0.000	-2.224	1321.076	0.120
73-206	0.876	0.838	0.002	0.618	0.000	-1.194	1755.504	0.125
127-196	0.711	0.680	0.003	0.545	0.000	-1.331	1415.815	0.120

A pesar de que esta red presentó valores altos de resiliencia, todos fueron mayores a 0.5, los demás indicadores presentaron valores negativos en cuanto a la confiabilidad de la red. Al igual que en el caso de Bugalagrande, se observó una relación entre la confiabilidad y el superávit mínimo de la red

y también se identificó nuevamente la diferencia que existe entre la resiliencia y la confiabilidad de una RDAP.

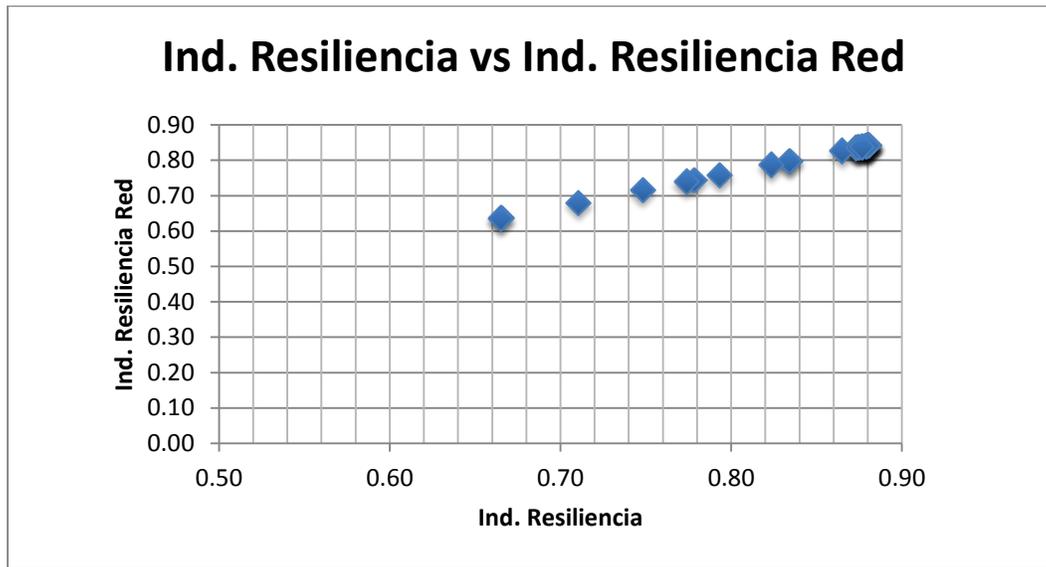


Figura 61. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Como en las redes anteriores, se presentó una relación lineal entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red. La influencia de la redundancia de diámetros en la red nuevamente se reflejó en una leve disminución de los valores del índice de resiliencia de la red en comparación con el índice de resiliencia tradicional.

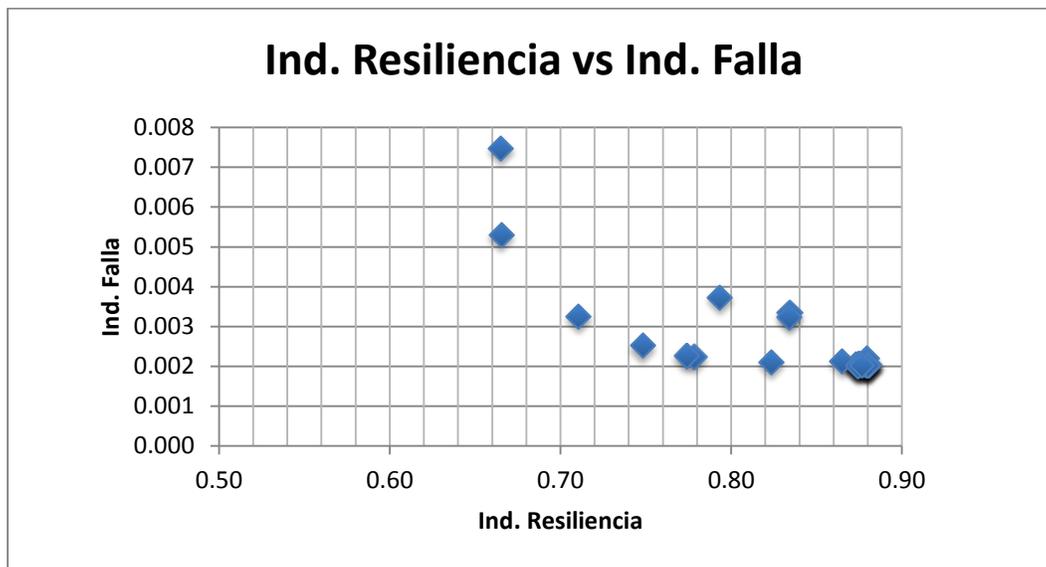


Figura 62. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Como se observa en la Figura 62 , la relación entre el índice de resiliencia y el índice de falla, para esta red no fue lineal. Sin embargo, se encontró una disminución en el índice de falla a medida que la resiliencia aumentaba. Sin embargo, lo más relevante de esta relación es que, a pesar de la alta resiliencia encontrada, el índice de falla presentó valores mayores a cero en todas las simulaciones.

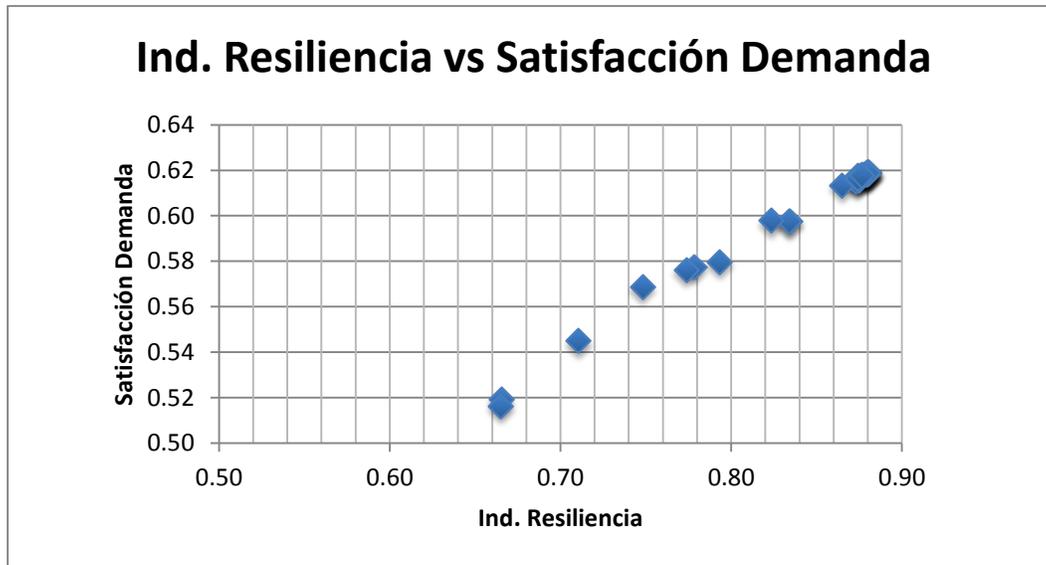


Figura 63. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Para la tasa de satisfacción de demanda se identificó una relación lineal con el índice de resiliencia, sin embargo, al igual que con el índice de falla es necesario resaltar que a pesar de la alta resiliencia se presentaron valores inferiores a uno para este indicador, lo cual marca la disminución en la confiabilidad de la red.

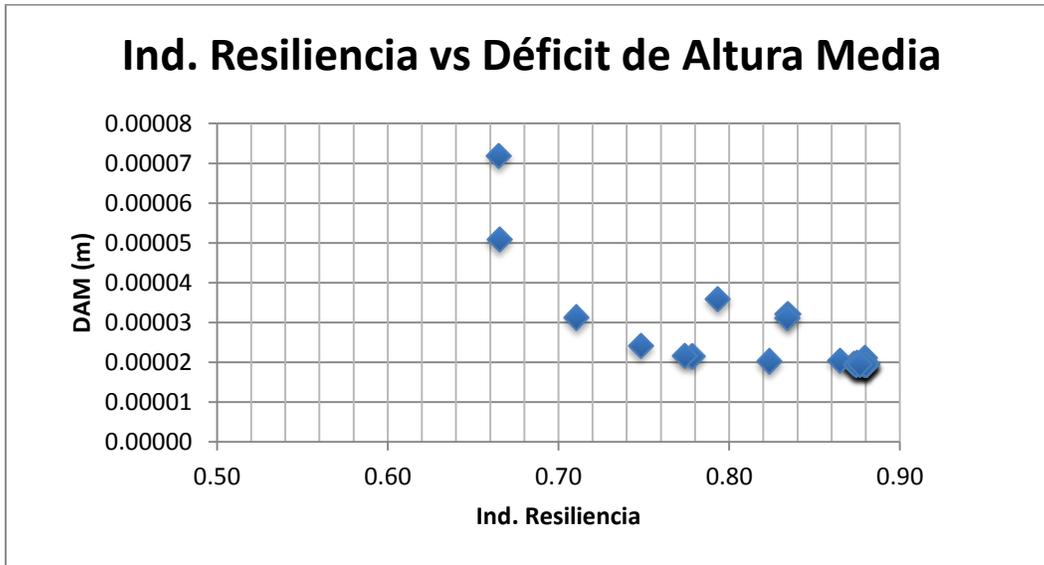


Figura 64. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

El caso del déficit de presiones, que se observa en la Figura 64, es similar a los analizados previamente. A pesar de que la resiliencia es alta, se encontró que en todas las simulaciones existía un déficit de presión, que igualmente disminuye al aumentar la resiliencia.

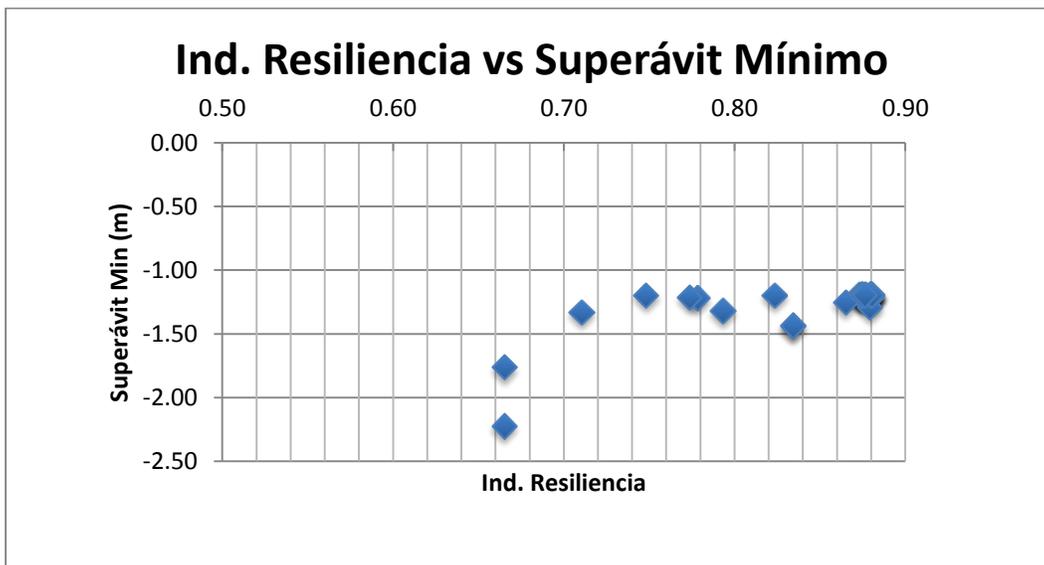


Figura 65. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

A pesar de que inicialmente se planteó una relación entre el índice de resiliencia y el superávit mínimo y el déficit de presión, las últimas redes han permitido determinar que estos indicadores tienen una relación más directa con la confiabilidad de la red. A pesar de que en algunas

circunstancias la resiliencia y la confiabilidad coinciden, en algunos casos, como en esta red, una alta resiliencia no garantiza una alta confiabilidad. Esto se observa en las Figuras 64 y 65, donde a pesar de que se presentan valores altos de resiliencia, la existencia de un superávit mínimo negativo y de un déficit de presión, tienen una influencia negativa en la confiabilidad de la red.

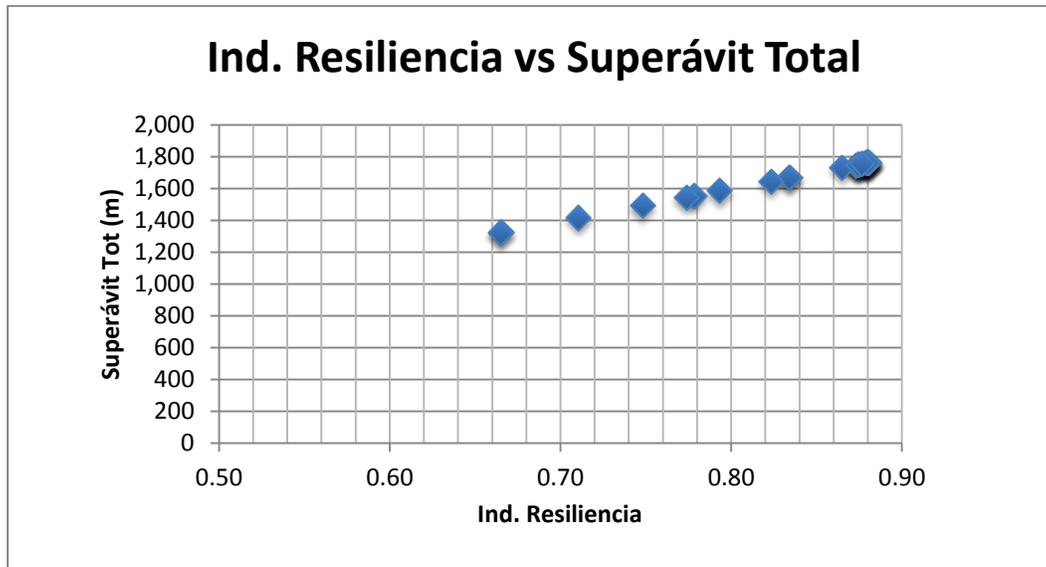


Figura 66. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Como se observa en la Figura 66, la linealidad entre el índice de resiliencia y el superávit total de la red se mantiene constante en todas las redes analizadas hasta el momento.

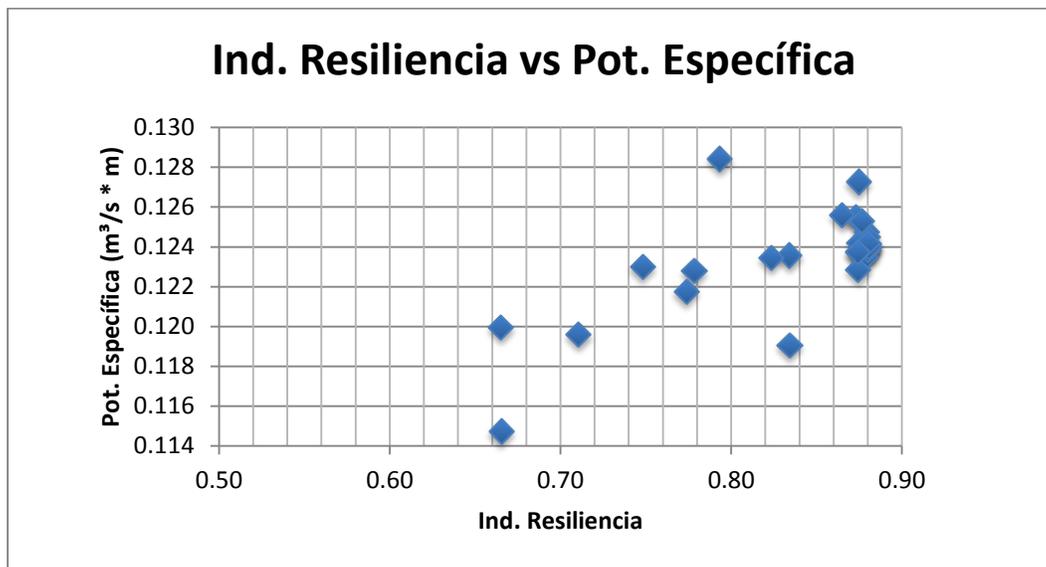


Figura 67. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, para el caso de Ginebra, nuevamente se encontró una relación lineal entre la resiliencia y la potencia específica. Sin embargo, en este caso se observó una dispersión de datos que no respetaban dicha linealidad, esto se observa en la Figura 67. Al analizar detalladamente algunos grupos de datos se encontró que en algunas simulaciones, la variación del índice de resiliencia y la potencia específica, resultaba muy pequeña y por ende, al momento de graficar los datos se presentaban zonas de aglomeración de puntos.

## 6.9 GUACARÍ

Para la red de Guacarí, una vez más, se presentó una coincidencia entre baja resiliencia y baja confiabilidad. En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 10. Resultados de Guacarí.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.232	0.219	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3682.660	3.375
54-632	0.232	0.219	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3682.622	3.375
224-294	0.217	0.204	0.030	0.850	0.0004515	-14.422	3371.160	3.521
236-270	0.205	0.193	0.012	0.882	0.0001734	-14.421	3154.108	3.319
216-523	0.187	0.176	0.012	0.883	0.0001732	-14.421	2987.026	3.442
19-400	0.227	0.213	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3609.930	3.372
74-117	0.232	0.219	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3682.138	3.374
143-273	0.190	0.178	0.012	0.879	0.0001734	-14.421	2851.326	3.414
193-350	0.176	0.165	0.012	0.884	0.0001737	-14.421	2836.708	3.461
87-150	0.228	0.214	0.012	0.891	0.0001716	-14.421	3613.444	3.368
460-463	0.231	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3670.190	3.375
312-412	0.227	0.213	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3600.930	3.377
26-355	0.232	0.219	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3681.467	3.375
284-347	0.209	0.197	0.012	0.891	0.0001734	-14.421	3329.705	3.322
458-467	0.232	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3675.949	3.374
78-384	0.198	0.186	0.012	0.890	0.0001712	-14.421	3185.298	3.407
408-482	0.227	0.213	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3617.890	3.383
421-440	0.232	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3678.660	3.376
182-191	0.182	0.171	0.012	0.886	0.0001727	-14.421	2896.919	3.404
94-486	0.192	0.180	0.012	0.886	0.000172	-14.421	3054.126	3.433
373-379	0.186	0.175	0.012	0.869	0.0001808	-14.421	3041.176	3.370
124-337	0.232	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3677.564	3.376
564	0.221	0.207	0.035	0.887	0.0005187	-26.339	3481.059	3.359
154-284	0.179	0.168	0.012	0.888	0.0001754	-14.421	2863.061	3.342
451-508	0.232	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3672.503	3.375
405-636	0.232	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3679.041	3.375
165-407	0.231	0.218	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3665.425	3.372
83-286	0.226	0.212	0.012	0.892	0.0001714	-14.421	3586.498	3.373
22-414	0.222	0.208	0.012	0.892	0.0001716	-14.421	3443.902	3.401
330-377	0.227	0.214	0.012	0.891	0.0001716	-14.421	3606.874	3.368

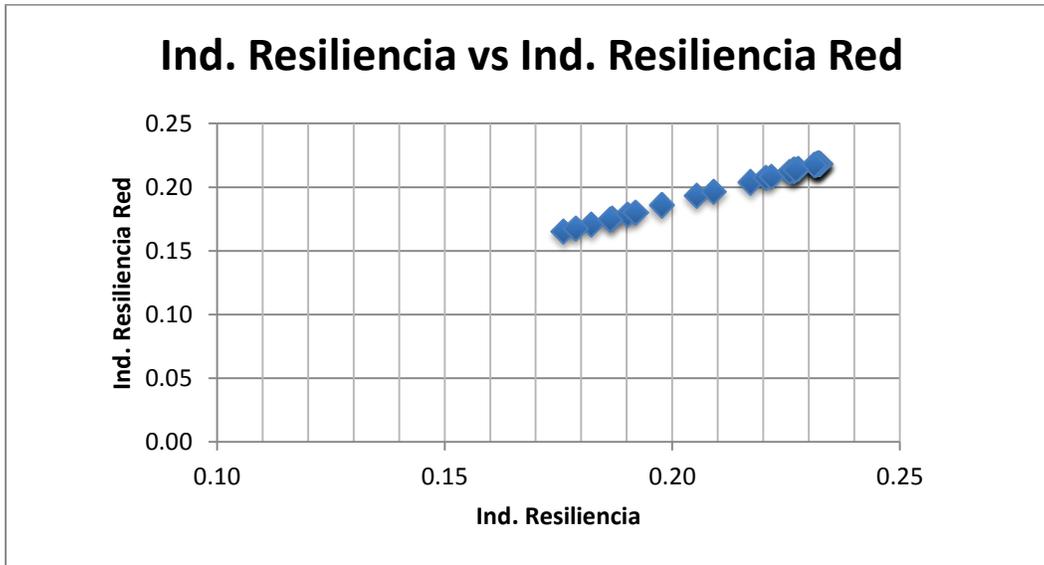


Figura 68. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

A pesar de que para la red de Guacarí se presentaron valores considerablemente bajos de resiliencia, nuevamente se encontró una tendencia lineal entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red.

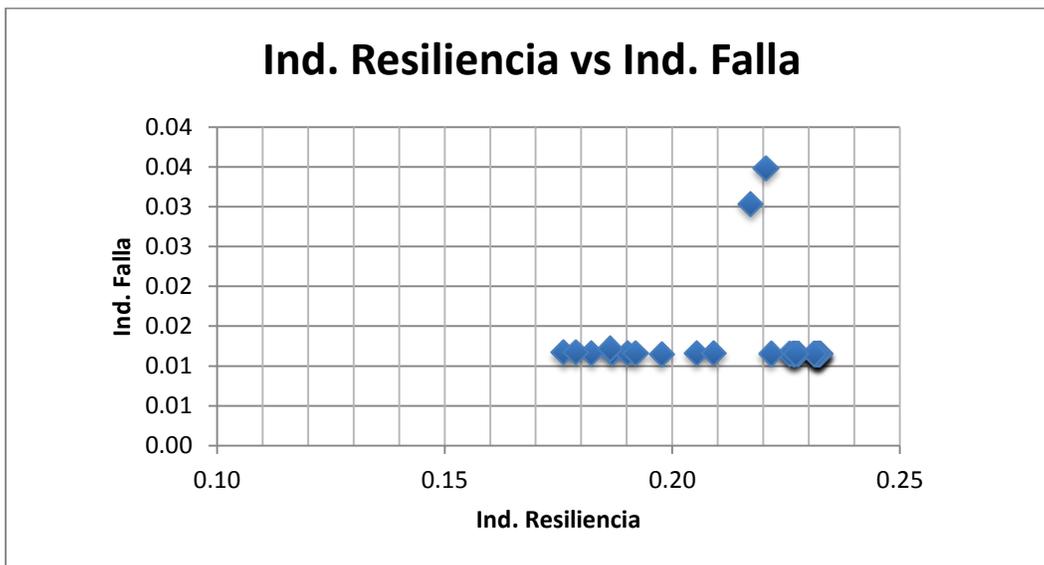
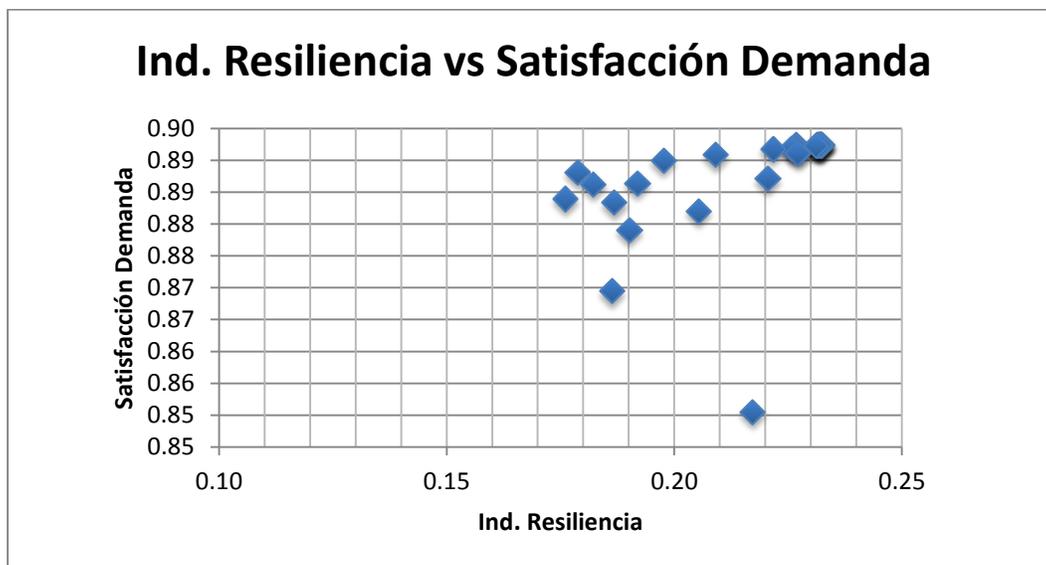


Figura 69. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Al analizar el índice de falla se encontró que este presentó un comportamiento prácticamente constante. Este comportamiento puede ser ocasionado por la configuración misma de la red; como se puede observar en la Tabla 10, en todas las simulaciones los valores de los índices calculados no

varían considerablemente. Es decir que, sin importar los cierres que se hagan, existen ciertas características que no se modifican. Esto se puede observar claramente al analizar, por ejemplo, los valores del superávit mínimo; como se observa en la Tabla 10, este indicador se mantiene constante durante prácticamente todas las simulaciones, solo en un caso se obtiene un valor distinto. Esto se traduce en que, con excepción de algunos casos aislados, cuando se realizan cierres de casi cualquier tubería, la presión mínima que existe en la red se mantiene constante. Esta estabilidad de presiones, que en este caso no es algo favorable para la confiabilidad de la red, se refleja en otros índices, como el déficit de altura media, y es la razón por la cual se presentan variaciones muy pequeñas entre los índices calculados para la red de Guacarí.



**Figura 70. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.**

En el caso de la tasa de satisfacción de demanda, como era de esperarse se encontraron valores que representan una disminución en la confiabilidad de la red. En este caso esta disminución coincidió con una baja resiliencia. A pesar de que con este indicador no se aprecia un comportamiento constante como con el índice de falla, al observar detenidamente la Figura 70 se observa que la variación de este índice es muy pequeña. Con excepción de un punto, la tasa de satisfacción de demanda se mantiene entre 0.87 y 0.9.

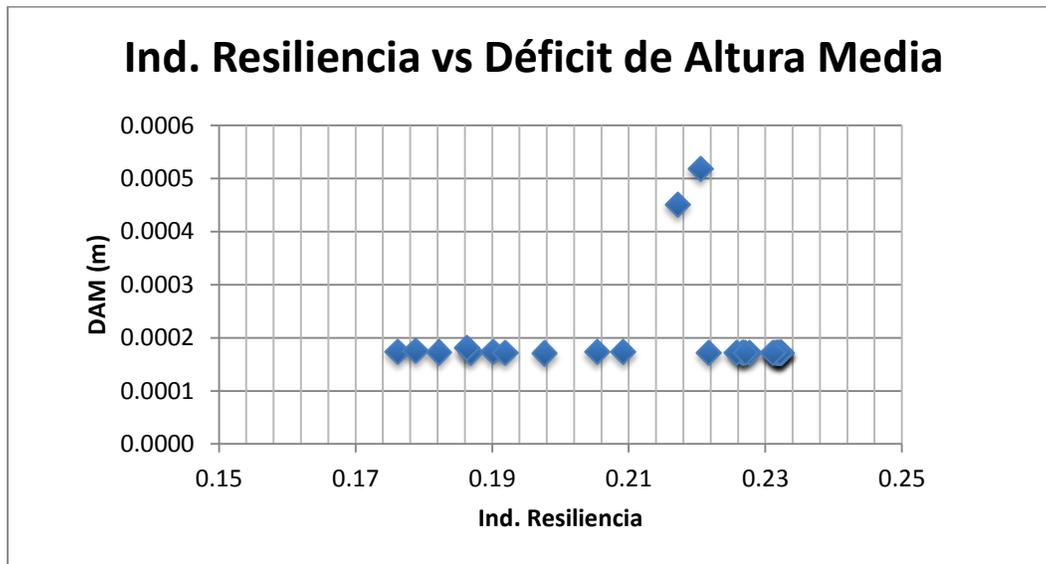


Figura 71. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

Como se observa en la Figura 71, el déficit de presiones se mantuvo prácticamente constante en todas las simulaciones, solo en dos casos se presentaron valores distintos. En este caso, la existencia de un déficit de presión coincide con valores bajos del índice de resiliencia, pero como se ha mencionado anteriormente, puede que estos indicadores no estén directamente relacionados. Con relación a los dos casos que presentan cierta variación en el valor del déficit de altura media, es necesario mencionar que pueden estar causados por una disminución considerable en la presión de algunos nudos de la red; esto a su vez puede deberse a que los cierres que se realizaron en las simulaciones correspondientes, comprometen seriamente el suministro adecuado, en términos de demanda y de presión, de agua potable para algunos nudos.

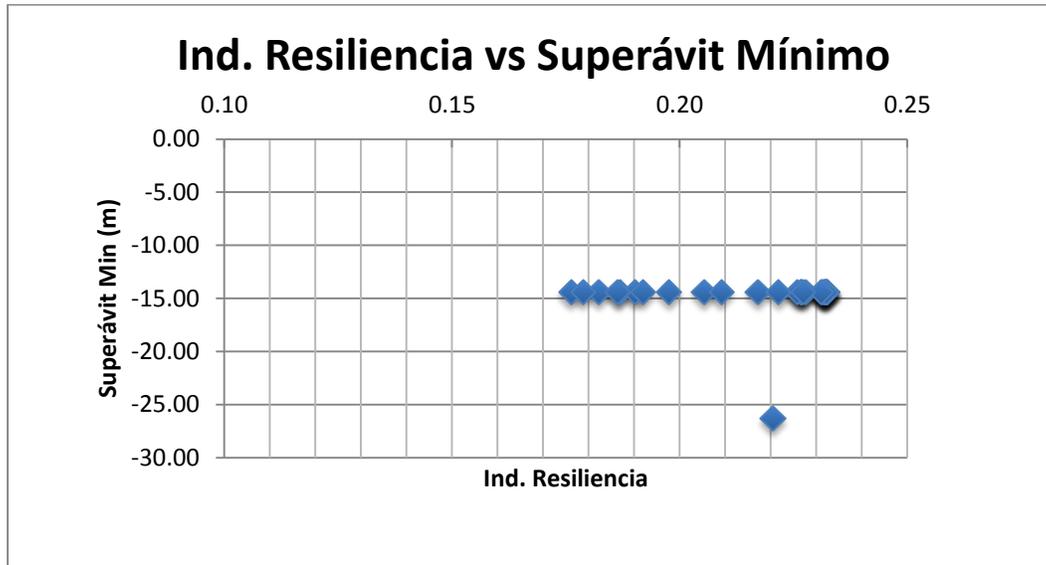


Figura 72. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

En la Figura 72 se observa la relación entre el mínimo surplus y el índice de resiliencia. Esta situación es la misma que se explicó para la Figura 71. Adicionalmente es oportuno mencionar que, el punto en la figura anterior, en donde se presenta una disminución del superávit mínimo, pudo ser ocasionado por el cierre de alguna tubería que comprometió el funcionamiento de un grupo de nudos.

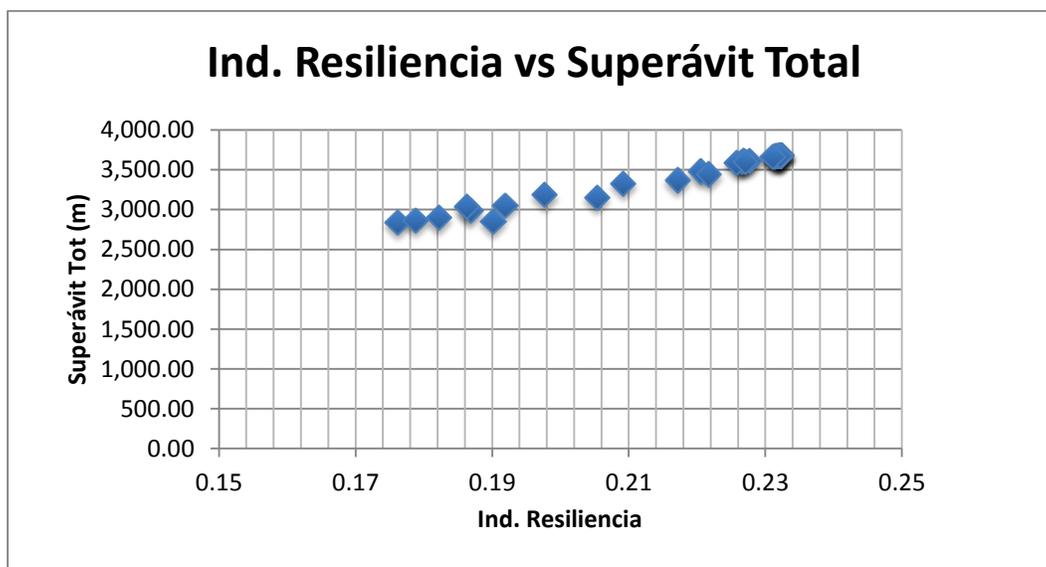


Figura 73. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Para el superávit total, nuevamente se encontró una relación lineal con el índice de resiliencia, confirmando una vez más los planteamientos de Todini al desarrollar el concepto de resiliencia.

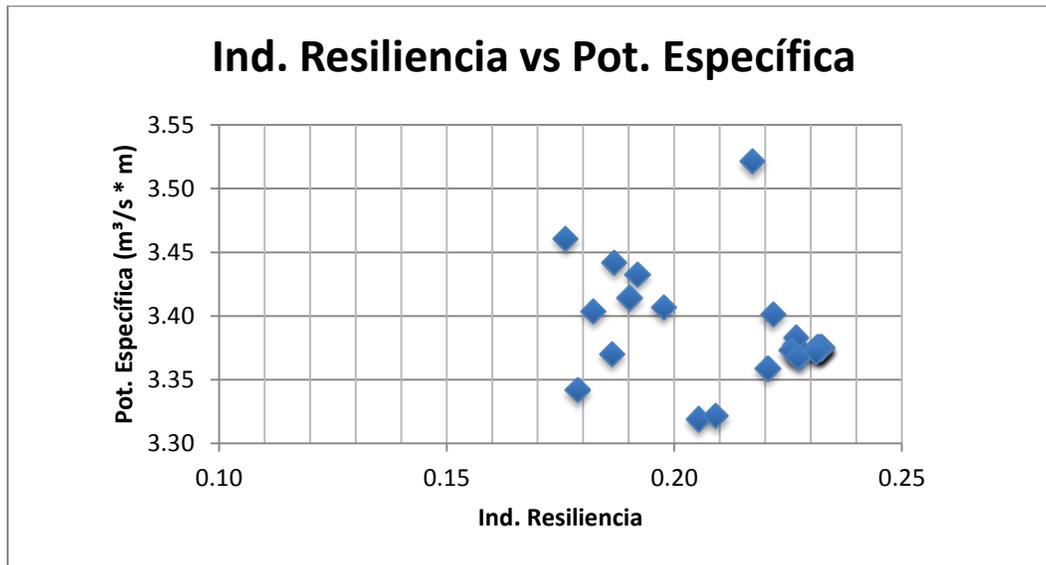


Figura 74. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último al analizar la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica, se encontraron leves variaciones de la potencia, que correspondieron en este caso a leves variaciones de la resiliencia. A pesar de que no hay una tendencia plenamente identificable es posible estimar que un aumento de resiliencia corresponde a una disminución de la potencia específica.

## 6.10 HANOI

La red de Hanói, que se utilizó principalmente como herramienta de comparación, presentó los siguientes resultados, que de cierta forma confirmaron las suposiciones realizadas en los últimos numerales.

**Tabla 11. Resultados para Hanoi.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.605	0.605	0	1	0	47.627	1578.656	174.093
20	0.449	0.449	0	1	0	25.812	1158.769	247.758
3	0.467	0.467	0	1	0	28.144	1198.320	239.333
5-29	0.498	0.498	0	1	0	31.517	1292.975	224.685
24	0.603	0.603	0	1	0	47.193	1572.102	175.001
17	0.532	0.532	0	1	0	38.614	1371.346	208.732
7-33	0.576	0.576	0	1	0	40.963	1481.546	187.961
8-18-25	0.091	0.091	0.927	0.516	0.139	-33.194	114.356	416.259
9-25	0.593	0.593	0	1	0	43.401	1534.573	179.829
31	0.605	0.605	0	1	0	47.566	1578.008	174.185
7-23	0.412	0.412	0	1	0	15.030	960.222	264.784
26	0.605	0.605	0	1	0	47.293	1575.764	174.359
13	0.601	0.601	0	1	0	44.337	1573.647	175.918
14-32	0.594	0.594	0	1	0	41.848	1558.362	179.181
19-28	0.466	0.466	0	1	0	25.290	1205.717	239.797

En esta red se encontró una variación importante en los valores del índice de resiliencia; así como se presentaron índices adecuados (mayores a 0.5), también se presentaron valores bajos de resiliencia. Adicionalmente es importante mencionar que, en la mayor parte de los casos, los índices de confiabilidad presentaron valores óptimos; únicamente en una simulación se presentaron valores distintos para los índices de confiabilidad, corresponde a valores negativos del superávit mínimo, del déficit de altura media y valores bajos de resiliencia.

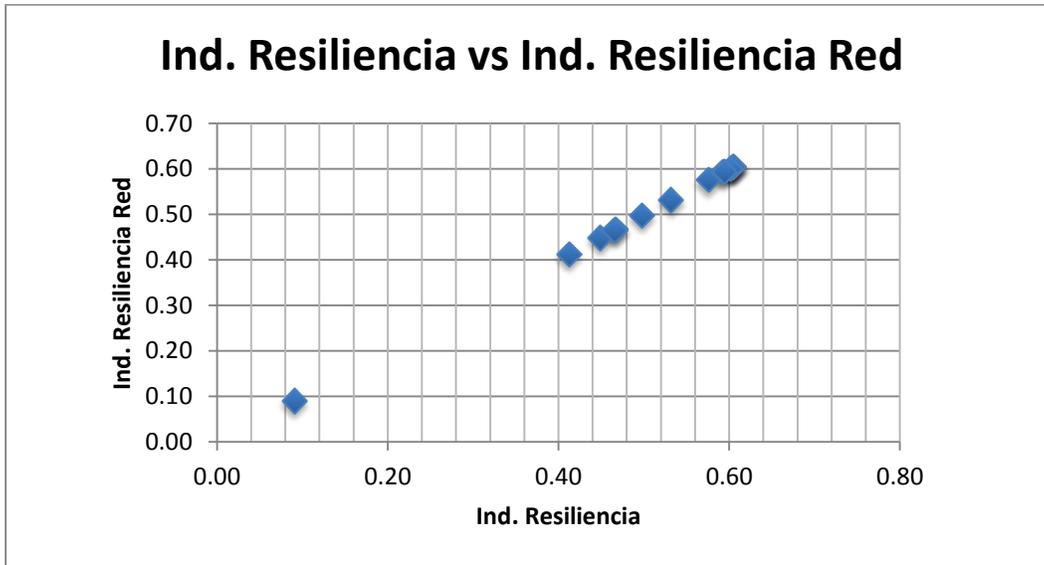


Figura 75. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

En cuanto a la relación entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red se encontró nuevamente una relación lineal. En este caso es importante mencionar que ambos índices presentaron el mismo valor pues todas las tuberías de esta red tienen el mismo diámetro.

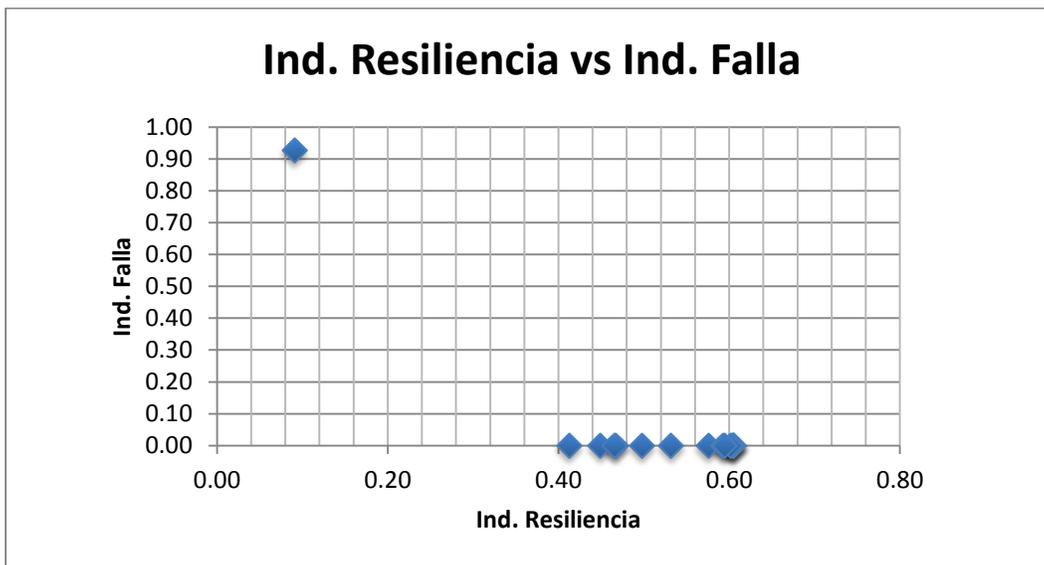


Figura 76. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

En relación al índice de falla, en esta red nuevamente se presentó una coincidencia entre confiabilidad y resiliencia. En las simulaciones donde la resiliencia fue mayor, o cercana, a 0.5 el índice de falla fue cero.

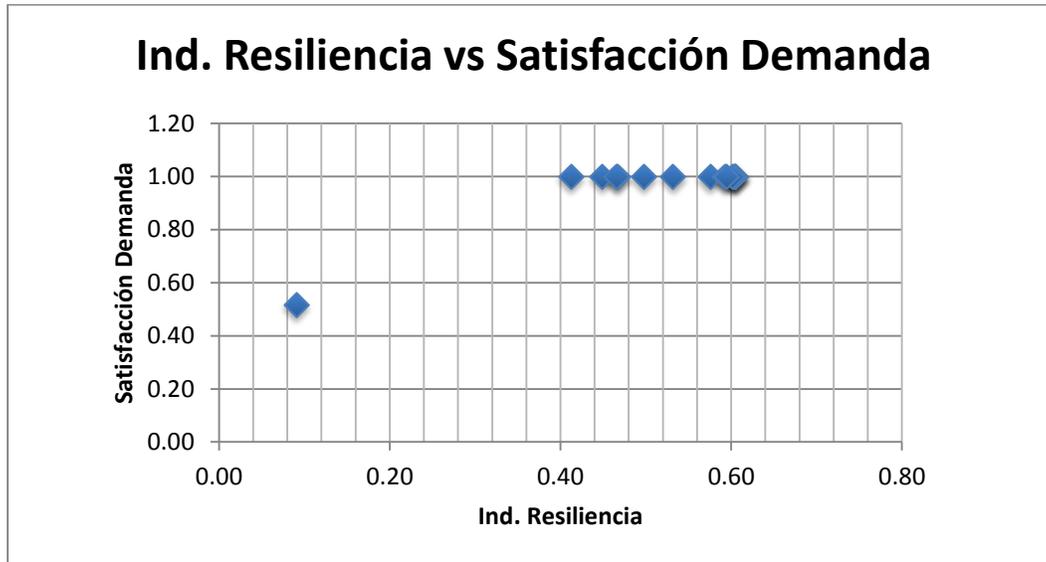


Figura 77. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

En cuanto a la tasa de satisfacción de la demanda se presentó la misma situación que con el índice de falla. Solo en una simulación la tasa de satisfacción presentó un valor distinto a uno. Esta simulación corresponde a un caso donde existió un déficit de presión y un superávit mínimo negativo; lo que coincide con lo que se ha explicado en los últimos numerales.

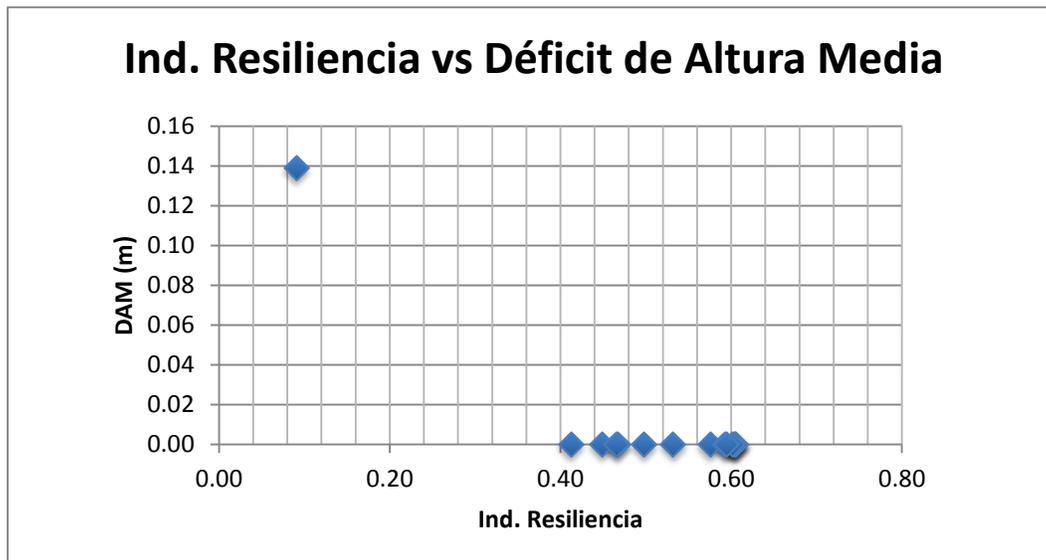


Figura 78. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

Como se dijo anteriormente, en prácticamente todas las simulaciones no se obtuvo un déficit de presión. Únicamente se presentó un caso donde este índice evidenció un déficit de presiones, el

cual coincide con los casos de disminución de confiabilidad y resiliencia descritos previamente. Sobre este caso en particular se debe mencionar que se presentó cuando se cerraron tres tuberías, de tal forma que uno de los circuitos cerrados que conforman la red resultara prácticamente aislado del resto de la red. Esto se realizó para observar los efectos de la pérdida de redundancia al interior de la red, dado que con los demás cierres que se realizaron la confiabilidad de la red no se vio comprometida, precisamente por la existencia de varios circuitos conectados entre sí. Al desconectar uno de estos circuitos, se logró observar la influencia que tienen dichos circuitos, y por ende la posibilidad de suministrar agua potable a un nudo por más de una tubería, en la confiabilidad de un RDAP.

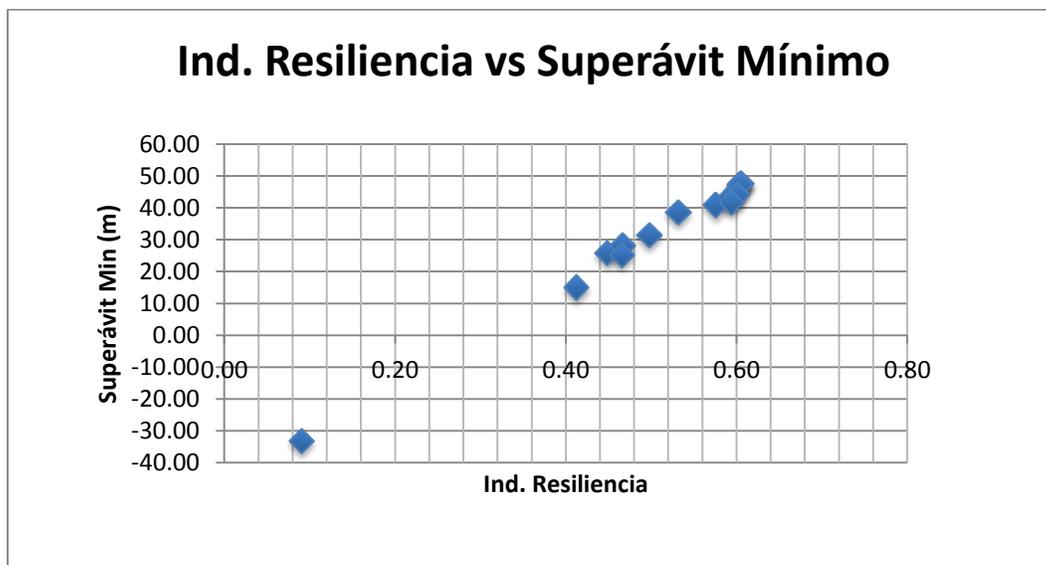


Figura 79. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Con el superávit mínimo se presentó la misma situación que con el déficit de presiones. Adicionalmente se encontró una tendencia lineal entre el índice de resiliencia y el superávit mínimo de la red.

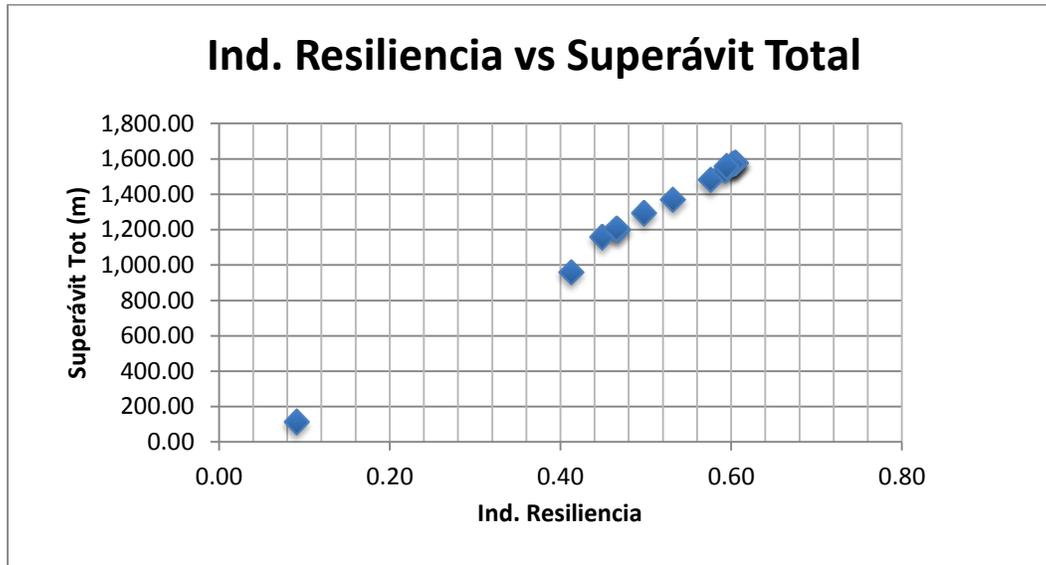


Figura 80. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

Como en los casos anteriores se encontró una relación lineal entre el índice de resiliencia y el superávit total de la red.

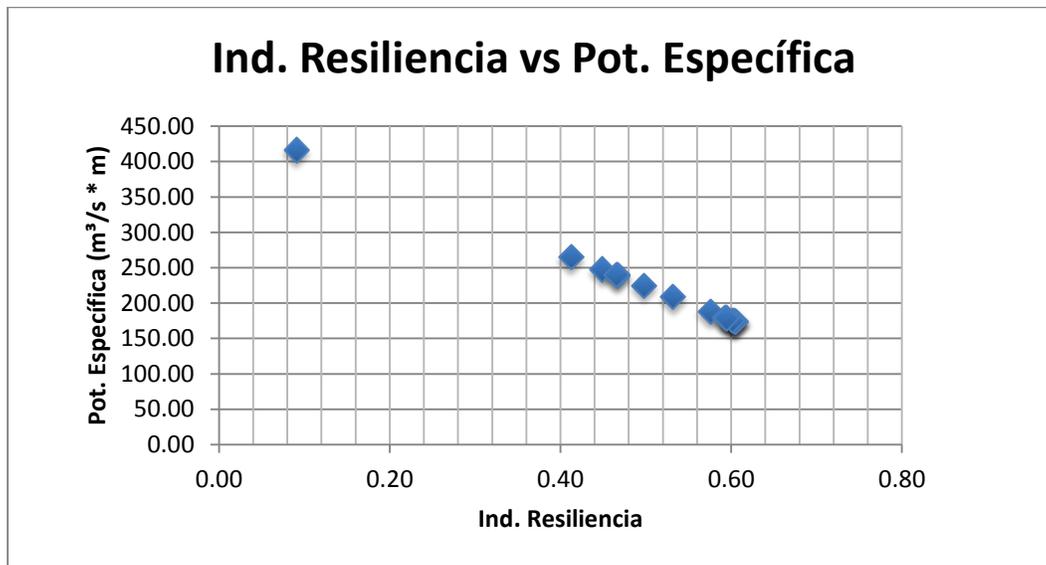


Figura 81. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, en la Figura 81 se observa la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica de la red. Como en redes anteriores se encontró una tendencia lineal para esta relación y a medida que la resiliencia de la red aumentaba se encontró que la potencia disminuía.

## 6.11 MEDELLÍN

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para la red de Medellín. En manera general los índices mostraron tanto una baja resiliencia como una baja confiabilidad.

**Tabla 12. Resultados Medellín.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129114.791	1492.399
5-324	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129114.027	1492.538
85-161	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129112.393	1492.224
178-572	0.00805	0.00764	0.01573	0.97687	0.00001396	-11.411	128861.746	1362.580
620-733	0.00807	0.00766	0.01571	0.97687	0.00001394	-11.407	129062.027	1453.874
52-75	0.00807	0.00766	0.01569	0.97687	0.00001392	-11.407	129015.560	1501.666
268-312	0.00804	0.00763	0.01568	0.97687	0.00001391	-11.408	128811.709	1516.848
343-627	0.00801	0.00760	0.01575	0.97687	0.00001397	-11.409	128234.826	1360.830
270-389	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129115.802	1494.326
648-664	0.00805	0.00764	0.01569	0.97687	0.00001392	-11.408	128834.800	1501.761
619-725	0.00803	0.00762	0.01566	0.97687	0.00001390	-11.408	128701.979	1528.976
46-364	0.00809	0.00768	0.01568	0.97687	0.00001391	-11.389	129225.692	1479.654
405-701	0.00803	0.00764	0.01569	0.97687	0.00001392	-11.446	129200.042	1106.657
171-627	0.00792	0.00751	0.01577	0.97687	0.00001399	-11.440	127478.116	1121.383
175-193	0.00805	0.00764	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.414	128831.407	1435.107
257-450	0.00808	0.00766	0.01568	0.97687	0.00001392	-11.408	129066.735	1468.720
173-706	0.00807	0.00766	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129105.915	1488.911
245-603	0.00807	0.00766	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129076.568	1478.737
212-517	0.00794	0.00754	0.01571	0.97687	0.00001394	-11.436	128411.044	1156.499
273-618	0.00809	0.00768	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.410	129182.273	1462.463
466-646	0.00805	0.00764	0.01571	0.97687	0.00001394	-11.416	128986.262	1396.264
559-690	0.00813	0.00772	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.458	129900.407	1061.005
76-451	0.00807	0.00766	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129085.640	1480.896
510-588	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129114.489	1490.260
89-446	0.00807	0.00766	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129060.012	1481.017
42-561	0.00808	0.00767	0.01569	0.97687	0.00001393	-11.407	129128.881	1480.522
231-275	0.00807	0.00766	0.01571	0.97687	0.00001394	-11.407	129050.094	1451.607
133-667	0.00807	0.00766	0.01571	0.97687	0.00001394	-11.433	129459.147	1245.007
297-726	0.00808	0.00767	0.01570	0.97687	0.00001393	-11.407	129113.107	1497.302
233-433	0.00799	0.00758	0.01572	0.97687	0.00001395	-11.438	128429.040	1228.273
222-465	0.00802	0.00761	0.01574	0.97687	0.00001397	-11.409	128473.186	1376.654

A pesar de que se esperaban valores adecuados en cuanto a la resiliencia, en las simulaciones se presentaron índices considerablemente bajos. Esto puede estar causado, no solo por las condiciones hidráulicas de la red, sino también por las condiciones del modelo utilizado. La presencia de pocos nudos con demanda base, y de tres tanques, dos de los cuales se encargaban de suministrar el agua de la red y uno que recibía gran parte de este caudal, podrían ser la razón principal para la presencia de una resiliencia tan baja. Sin embargo, al analizar tanto el déficit de presión como el superávit

mínimo resulta necesario aclarar que estos dos indicadores muestran problemas en la confiabilidad de la red, por lo que a pesar de considerar las condiciones del modelo, la red puede ser definida como poco confiable y resiliente.

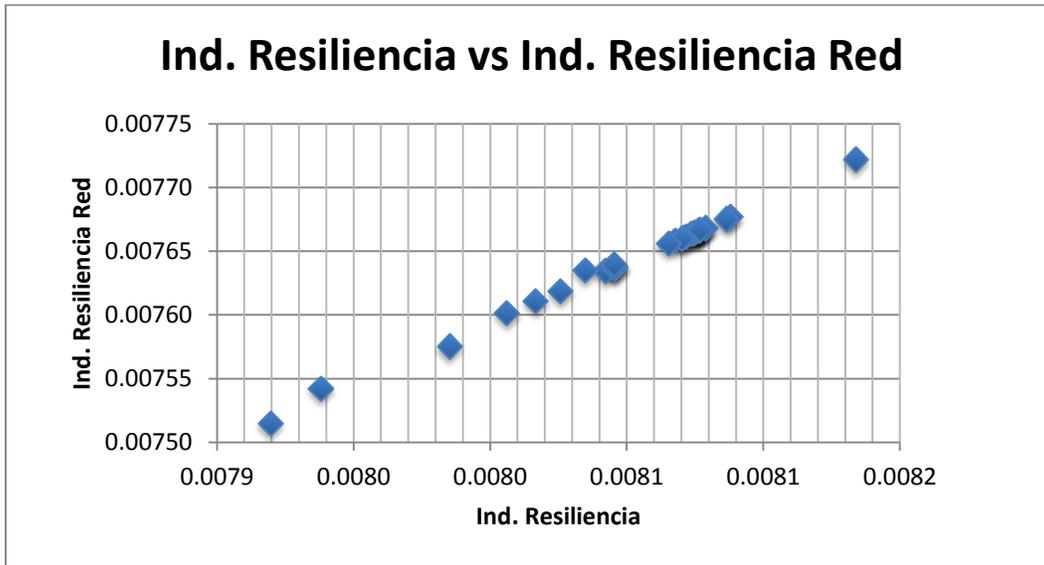


Figura 82. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

El índice de resiliencia de la red y el índice de resiliencia, al igual que en todas las redes anteriores, presentaron una tendencia lineal. A pesar de que en algunas simulaciones esta tendencia cambió levemente, los cambios nos son significativos como para desestimar la linealidad de la relación.

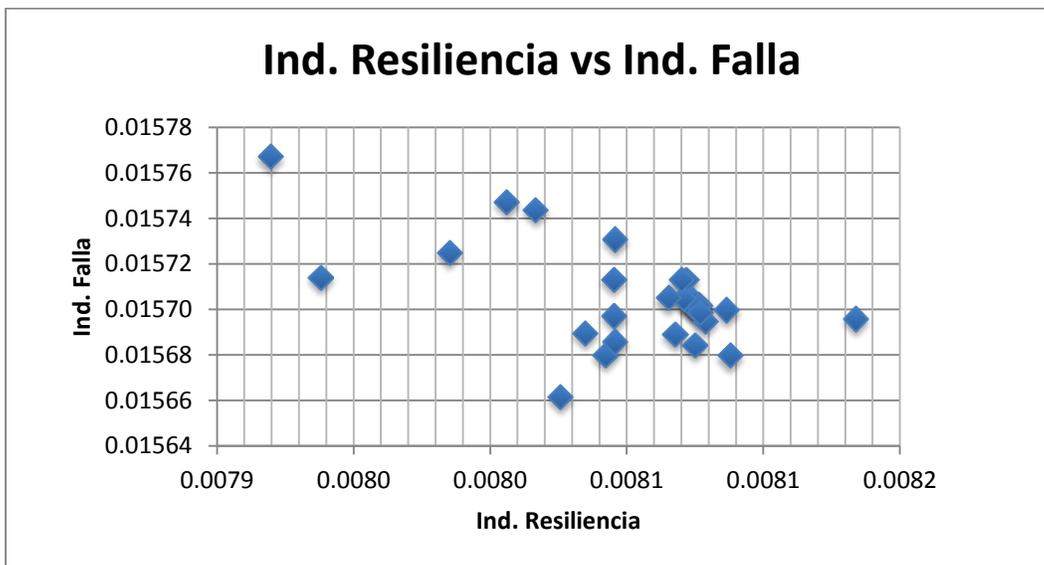


Figura 83. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Al analizar el índice de falla se encontró que en todas se presentaron valores para este índice mayores a cero, pero no presentó una variación relevante. Adicionalmente resulta oportuno mencionar que se presentó una similitud apreciable con el comportamiento del déficit de presiones.

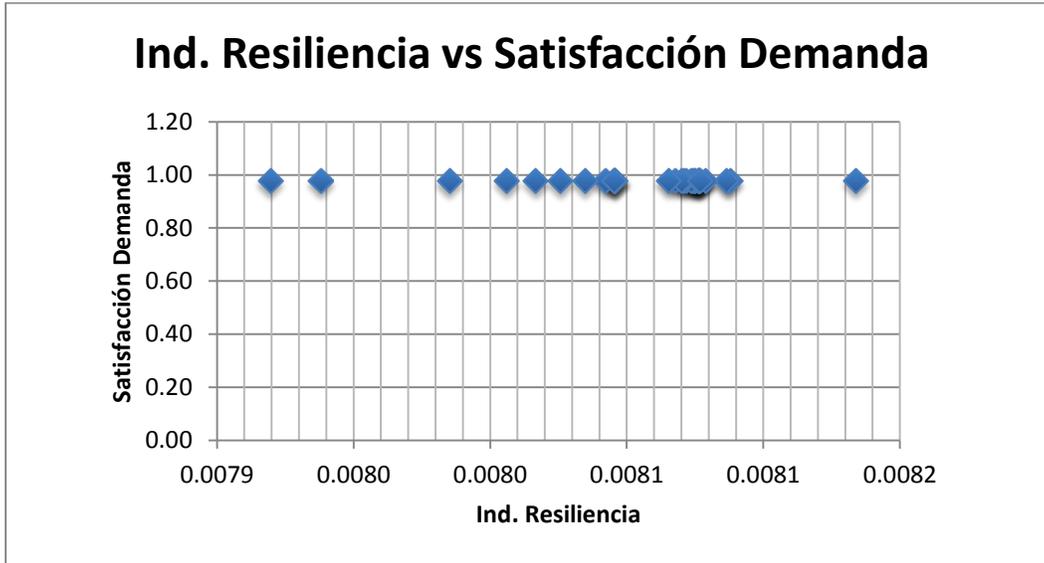


Figura 84. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

En el caso de la tasa de satisfacción de demanda se presentaron valores similares, es decir que la variación de los valores obtenidos para este índice fue mínima. Esto coincide con el comportamiento tanto del índice de falla como del superávit mínimo y del déficit de altura media.

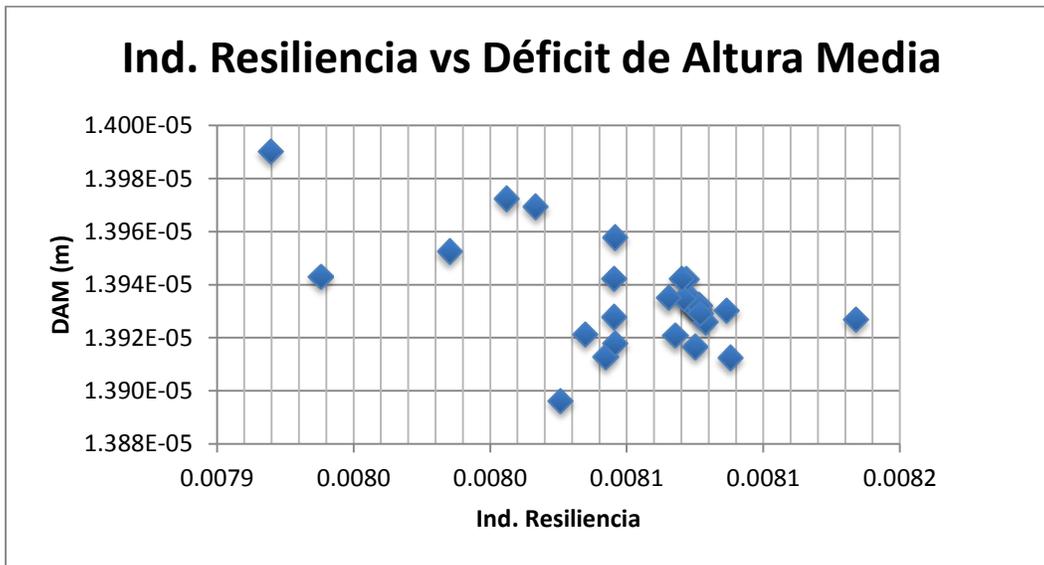


Figura 85. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

Como se mencionó anteriormente, el déficit de presiones presentó un comportamiento bastante homogéneo; a pesar de que al observar la Figura 85 pareciera que existe una dispersión considerable, al observar las escalas de la figura se concluye que en todos los casos el déficit fue prácticamente el mismo.

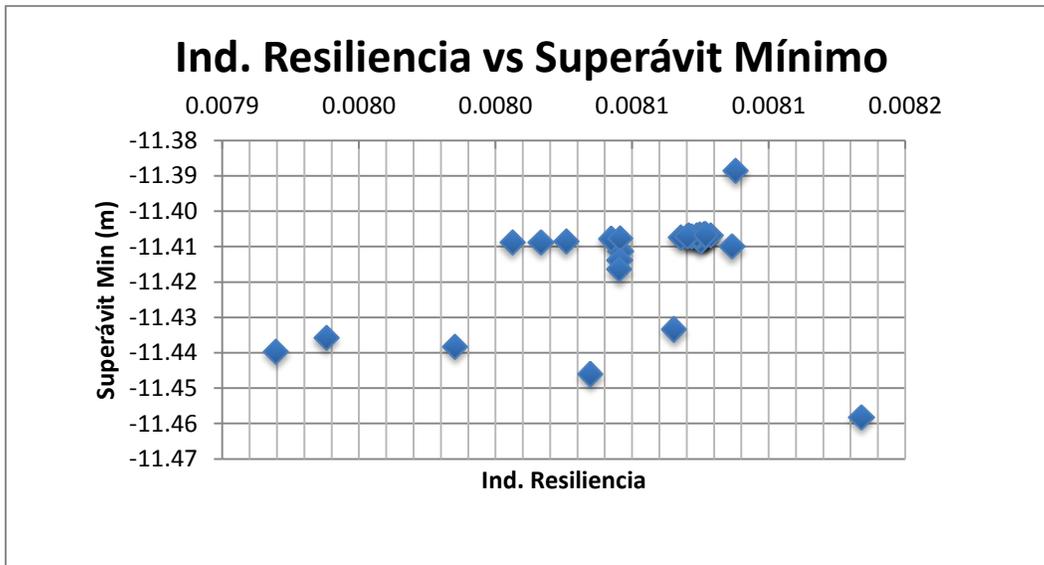


Figura 86. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Al igual que con el déficit de presión, el superávit mínimo presentó un comportamiento bastante homogéneo, es decir que no presentó grandes variaciones entre las distintas simulaciones. Como se había mencionado anteriormente, esta red permitió observar una relación directa entre el índice de falla y la tasa de satisfacción con el déficit de presión y el superávit mínimo.

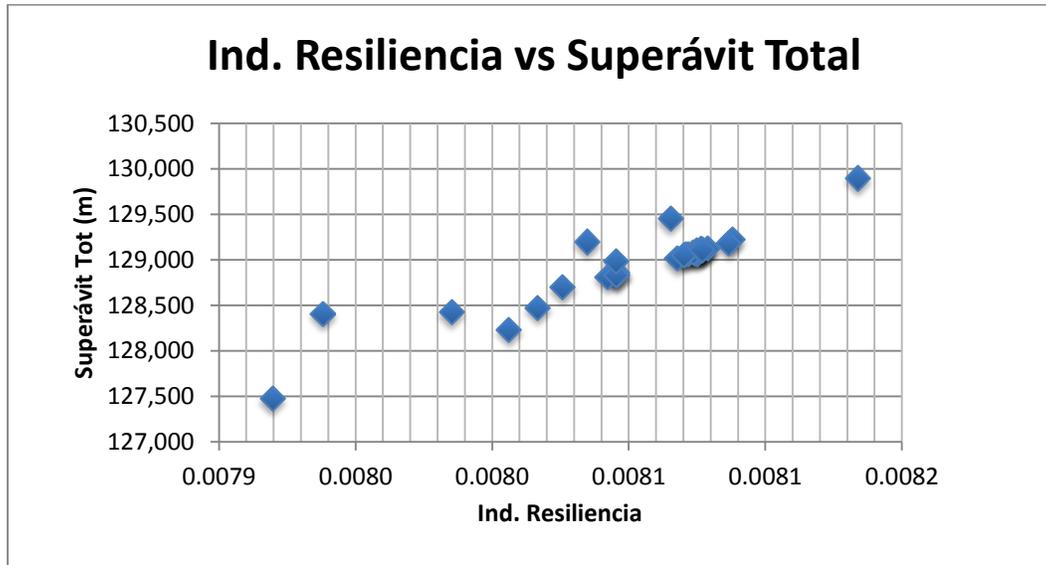


Figura 87. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

A pesar de que para la red de Medellín la relación entre el índice de resiliencia y el total surplus no fue completamente lineal, si coincide con lo encontrado en las redes anteriores.

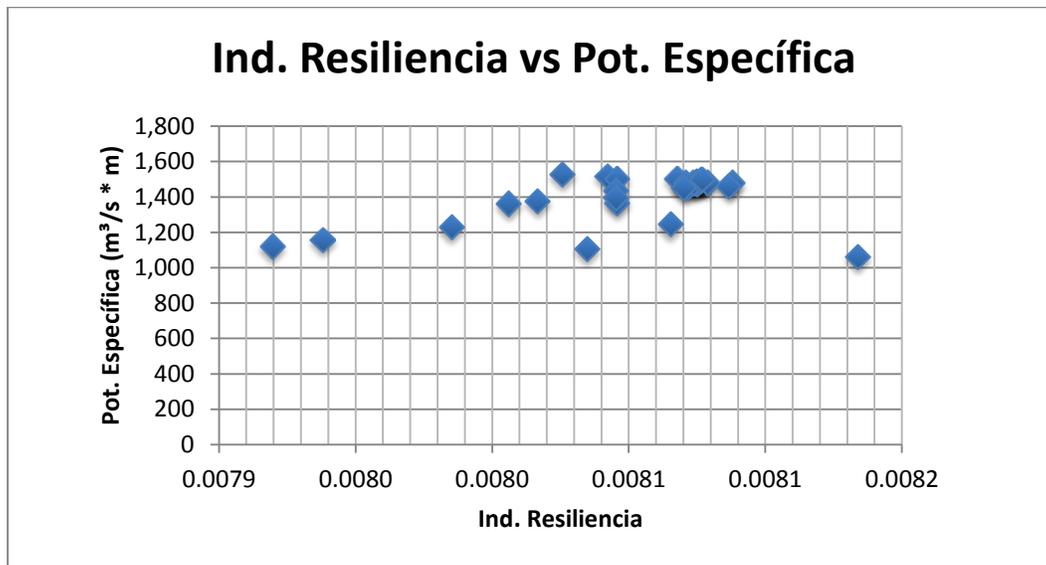


Figura 88. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, en la Figura 88, se observa la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica. A diferencia de las redes anteriores, en estas simulaciones no se encontró una tendencia lineal entre los dos indicadores. Sin embargo, esto puede estar causado por las pequeñas

variaciones que presentó el índice de resiliencia, ya que no permite analizar esta relación en una escala adecuada.

## 6.12 R28

Para la red R28, la cual es uno de los sistemas ficticios utilizados, se presentaron resultados muy similares a los de la red anterior. En la Tabla 13 se presentan los datos que se obtuvieron.

**Tabla 13. Resultados R28.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.716	0.606	0	1	0	19.58	1664.818	14.314
6	0.715	0.606	0	1	0	19.56	1664.375	14.272
23	0.709	0.601	0	1	0	19.42	1648.388	14.525
4-37	0.706	0.598	0	1	0	20.82	1643.104	13.461
19-22	0.710	0.602	0	1	0	19.36	1652.356	15.033
18	0.709	0.600	0	1	0	19.41	1645.139	14.277
67	0.687	0.582	0	1	0	19.58	1599.422	13.958
49-51	0.714	0.605	0	1	0	19.63	1659.095	14.290
41-16	0.671	0.569	0	1	0	17.87	1568.000	15.075
25	0.379	0.320	0.022	0.947	0.00165	-7.07	922.498	13.351
11-60	0.706	0.598	0	1	0	19.64	1644.515	14.361
20	0.481	0.406	0	0.992	0	2.81	1148.980	15.913
23-32-53	0.704	0.596	0	1	0	20.27	1636.260	14.038
8-19-28-57	0.688	0.583	0	1	0	17.70	1589.801	14.495
61-63	0.709	0.600	0	1	0	19.45	1642.380	14.255
21-22	0.338	0.284	0	0.990	0	1.89	845.349	16.457
30-33-65	0.605	0.513	0	1	0	7.71	1397.853	11.804
22-51	0.680	0.576	0	1	0	18.49	1584.514	15.493
11	0.711	0.602	0	1	0	19.35	1655.240	14.194
24-58	0.709	0.601	0	1	0	19.71	1645.533	14.231
35-37	0.702	0.594	0	1	0	21.58	1631.277	13.009
25-27-30	0.323	0.273	0.0199	0.9277	0.001495	-12.75	778.680	11.062
46-59	0.715	0.605	0	1	0	19.78	1662.207	14.298
27-65	0.645	0.547	0	1	0	17.23	1497.353	13.637
8-21-37	0.323	0.272	0	0.980	0	2.51	812.267	16.025
40-43-44	0.715	0.605	0	1	0	19.70	1661.008	14.128
7-50	0.715	0.605	0	1	0	19.59	1663.015	14.073
15-22-30	0.512	0.434	0	0.992	0	1.66	1190.533	12.738
15-23-25	0.273	0.231	0.0479	0.833	0.003591	-13.00	674.303	15.670
32-45	0.711	0.602	0	1	0	20.39	1653.027	13.891

Con respecto al índice de resiliencia se debe mencionar que en la gran mayoría de las simulaciones se obtuvieron valores de resiliencia relativamente altos. Sin embargo, en algunos casos se encontraron índices de resiliencia menores a 0.5; los cuales coincidieron con circunstancias de baja confiabilidad para la red. Adicionalmente, en esta red se observó que, incluso aunque no existiera

un déficit de presiones, cuando el superávit mínimo de la red arrojó valores cercanos a cero, el índice de tasa de satisfacción de demanda indicó una disminución en la confiabilidad de la red.

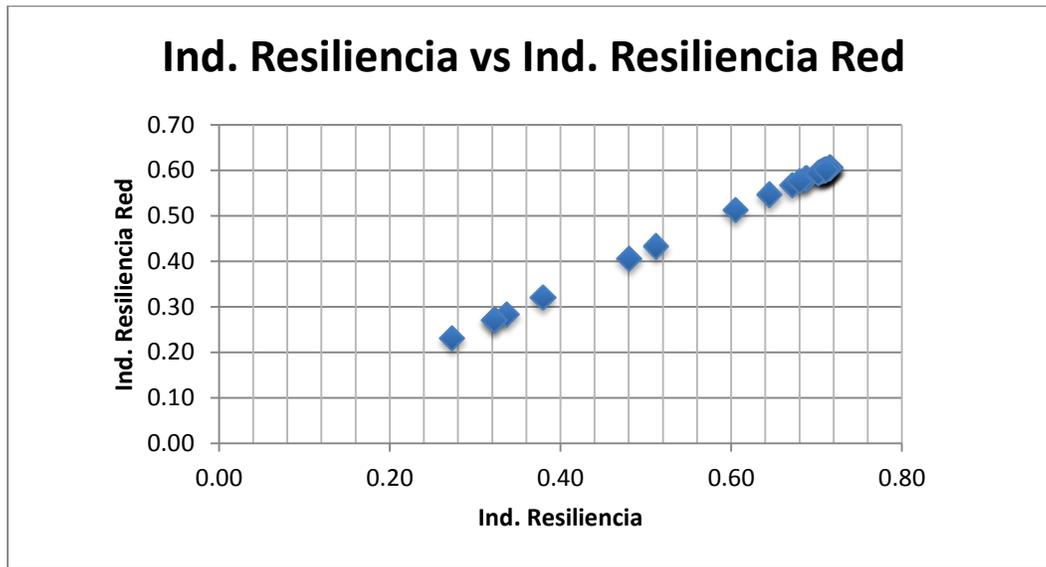


Figura 89. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

En cuanto a la relación entre índice de resiliencia e índice de resiliencia de la red, en la Figura 89 se observa que nuevamente se presentó una tendencia lineal.

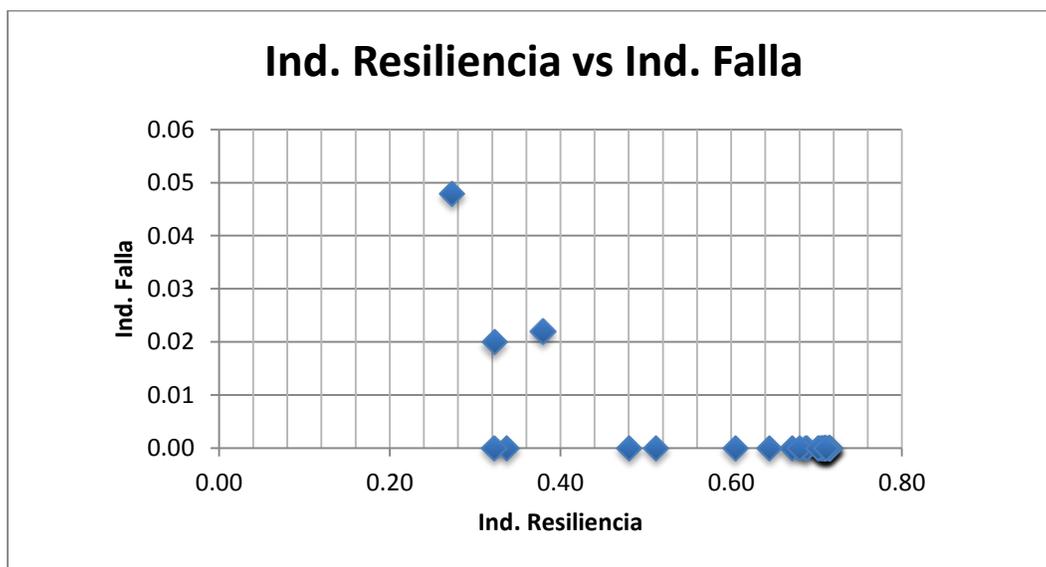


Figura 90. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

Al analizar el comportamiento del índice de falla se encontró que este presentó valores mayores a cero, principalmente en las simulaciones donde la resiliencia fue menor a 0.5. Sin embargo, al analizar el déficit de presiones y el superávit mínimo se encontró, nuevamente, una mayor relación con estos indicadores.

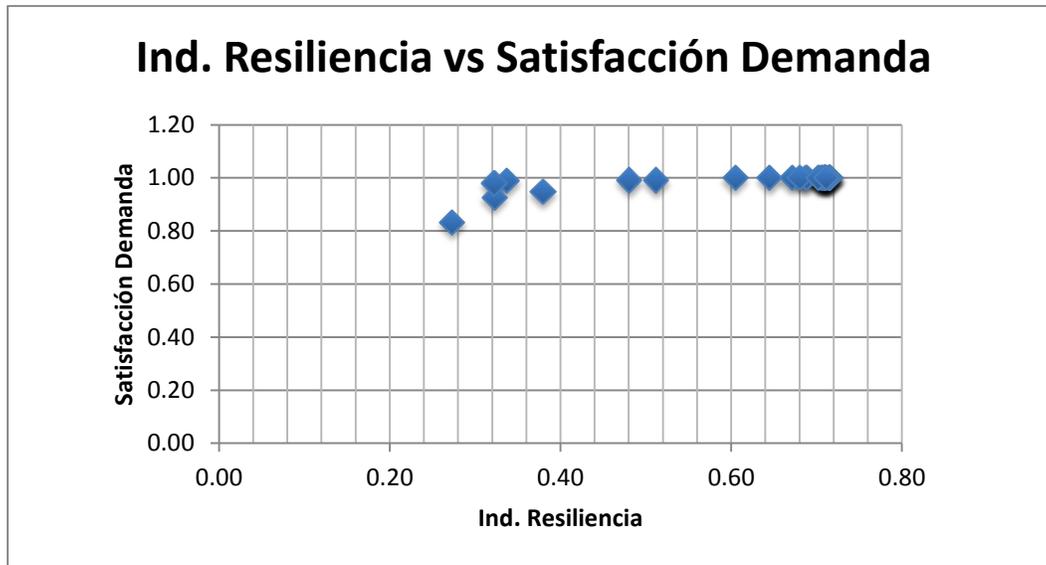


Figura 91. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Para la tasa de satisfacción de la demanda se presentó el mismo comportamiento que para el índice de falla. Sin embargo, como se resaltó anteriormente, cuando el superávit mínimo presentó valores positivos cercanos a cero, la tasa de satisfacción también presentó valores menores a uno.

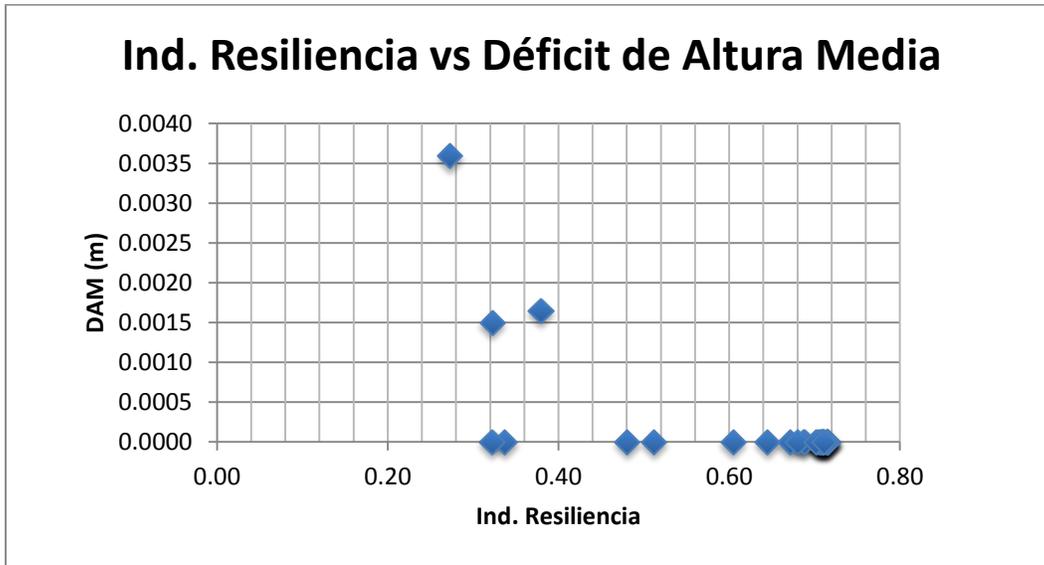


Figura 92. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

En la Figura 92 se observa el comportamiento del déficit de presiones versus el índice de resiliencia. Como se ha mencionado en los últimos numerales, a pesar de que pareciera existir una relación lineal entre estos dos indicadores, esta no se mantiene en todas las redes.

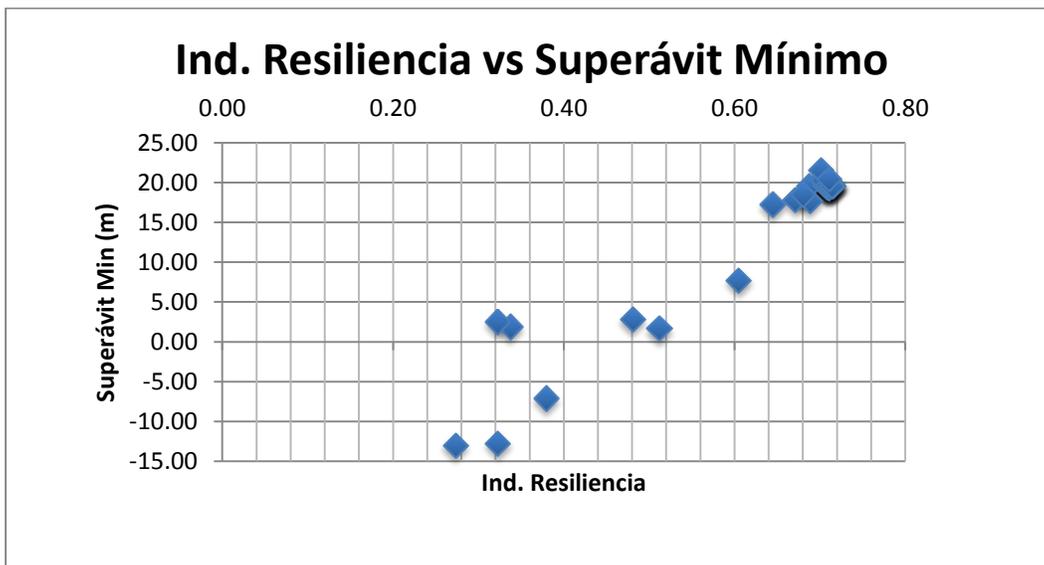


Figura 93. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

Como se observa en la Figura 93, al analizar el superávit mínimo se encontró una relación lineal con el índice de resiliencia. Sin embargo, es necesario mencionar que esta relación no siempre se

presenta y, como se ha observado, existe una relación más directa con la confiabilidad y no con la resiliencia.

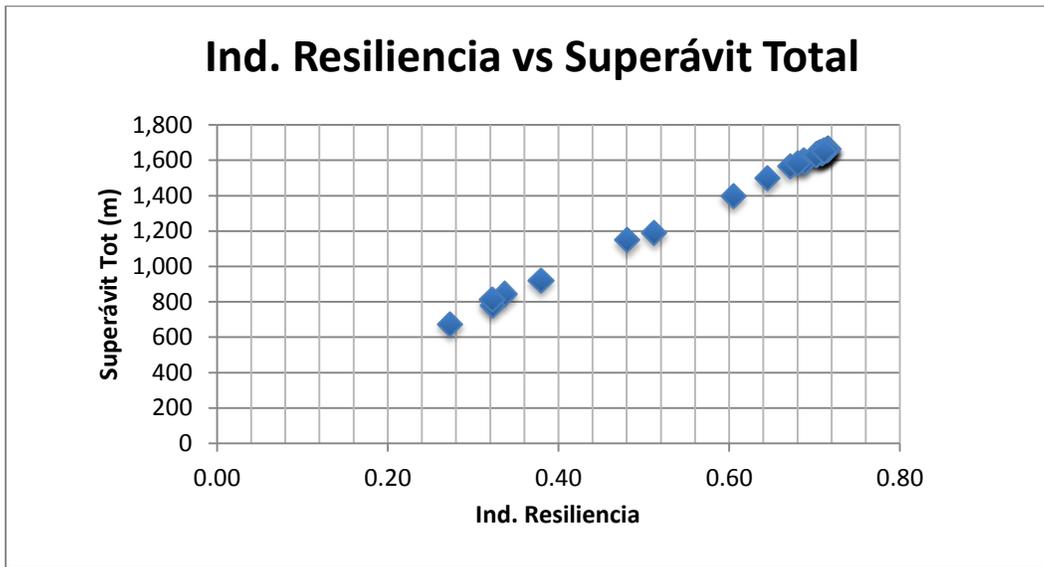


Figura 94. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.

En la Figura 94 se observa que, como en todas las redes anteriores, existe una relación lineal entre el índice de resiliencia y el superávit total de energía de la red.

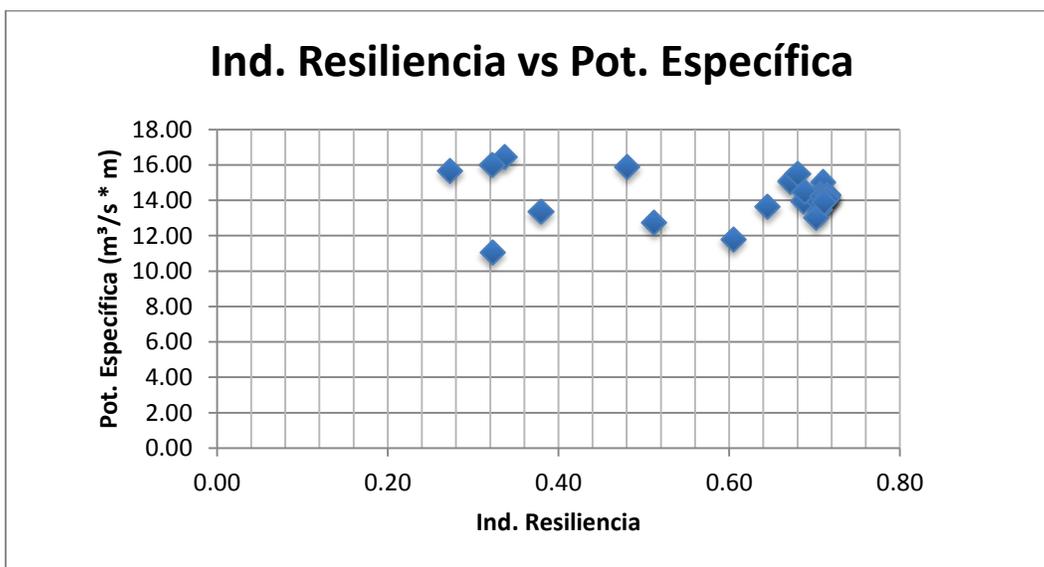


Figura 95. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica.

Por último, en la Figura 95, se observa la relación entre el índice de resiliencia y la potencia específica. A diferencia de las redes anteriores, para el sistema de R28, se presentó una variación importante en la potencia; sin embargo, no se identificó ninguna relación directa con el índice de resiliencia.

### 6.13 SAN VICENTE

La última red analizada fue la de San Vicente. En esta red nuevamente se encontró una diferencia entre la resiliencia y la confiabilidad de una RDAP. En la Tabla 14 se presentan los resultados.

**Tabla 14. Resultados San Vicente.**

Tubería	Ind. Resiliencia (-)	Ind. Resiliencia Red (-)	Ind. Falla (-)	Satisfacción Demanda (-)	Déficit de Altura Media (m)	Superávit Mínimo (m)	Superávit Total (m)	Pot. Específica (m <sup>3</sup> /s * m)
-	0.948	0.916	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.888	1733.640	0.715
8	0.942	0.910	0.01056	0.973	7.22E-05	-6.335	1721.337	0.732
43	0.945	0.913	0.00980	0.973	6.71E-05	-5.882	1728.453	0.722
40	0.948	0.916	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.888	1733.604	0.718
39	0.948	0.916	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.887	1733.602	0.712
6	0.925	0.893	0.01103	0.967	7.55E-05	-6.619	1696.951	0.676
17	0.947	0.915	0.00981	0.972	6.71E-05	-5.888	1733.112	0.715
16	0.947	0.915	0.00981	0.972	6.71E-05	-5.886	1732.488	0.715
5	0.947	0.915	0.00982	0.973	6.72E-05	-5.893	1732.052	0.756
45	0.947	0.915	0.00982	0.973	6.72E-05	-5.890	1732.932	0.725
63	0.948	0.916	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.887	1733.542	0.714
33	0.946	0.914	0.00980	0.973	6.71E-05	-5.881	1730.179	0.689
7	0.912	0.881	0.01234	0.973	8.45E-05	-7.406	1670.299	0.669
29	0.948	0.916	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.887	1733.393	0.702
3	0.945	0.913	0.00984	0.973	6.74E-05	-5.907	1727.971	0.825
8-30	0.941	0.910	0.01056	0.973	7.22E-05	-6.335	1721.203	0.721
5-16	0.946	0.914	0.00982	0.972	6.72E-05	-5.892	1730.913	0.755
27-51	0.946	0.914	0.00981	0.973	6.71E-05	-5.887	1730.153	0.752
6-35	0.925	0.893	0.01103	0.967	7.55E-05	-6.619	1696.950	0.676
7-38	0.912	0.881	0.01241	0.973	8.49E-05	-7.444	1669.251	0.675

En esta red, a pesar de que la resiliencia fue considerablemente alta, en todas las simulaciones se presentó un déficit de presión y un superávit mínimo negativo, lo que se tradujo en una reducción de confiabilidad marcada tanto por el índice de falla como por la tasa de satisfacción de la demanda.

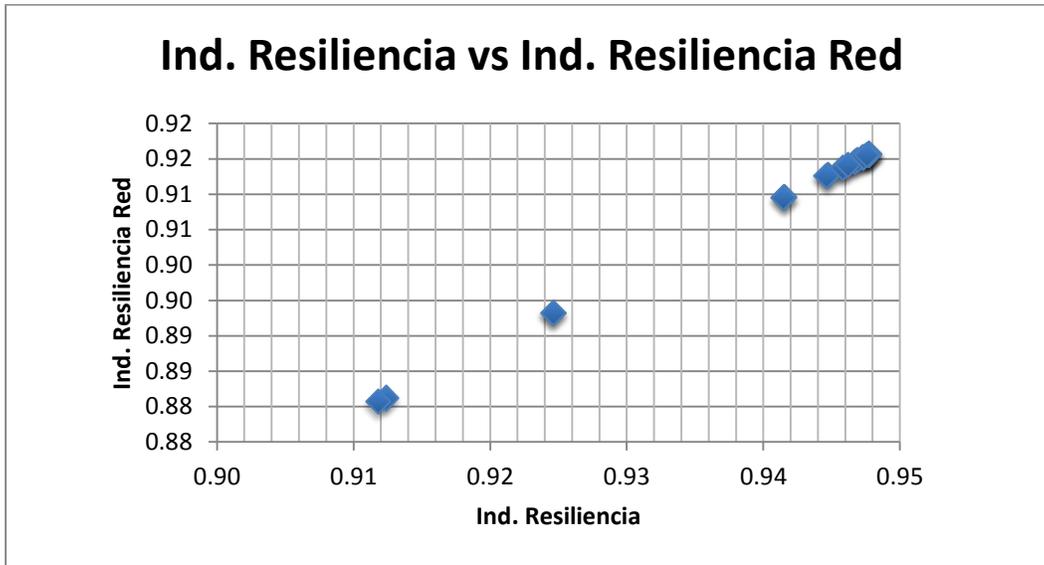


Figura 96. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red.

Como era de esperarse, una vez más se presentó una relación lineal entre el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red.

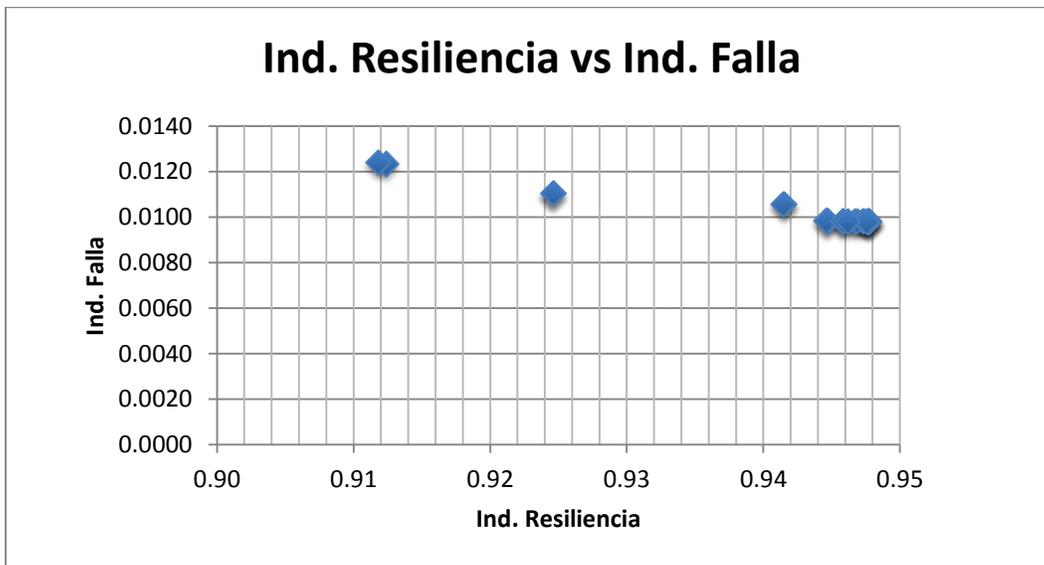


Figura 97. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla.

En esta red se presentó una tendencia inversamente proporcional entre el índice de falla y el índice de resiliencia, lo cual coincide con lo esperado. Sin embargo, a diferencia de la mayor parte de las redes anteriores, en este caso se presentaron simulaciones en las cuales, a pesar de que el índice de resiliencia era mayor a 0.5, el índice de falla presentaba valores mayores a cero. Esto sucedió

principalmente debido a la existencia de nudos con presiones inferiores a la mínima, que no se veían reflejados en el valor de la resiliencia de la red. La diferencia aparente entre resiliencia y confiabilidad, reflejada en los resultados del índice de resiliencia y de otros indicadores, tales como el índice de falla o el déficit de altura media, será retomada en los siguientes numerales.

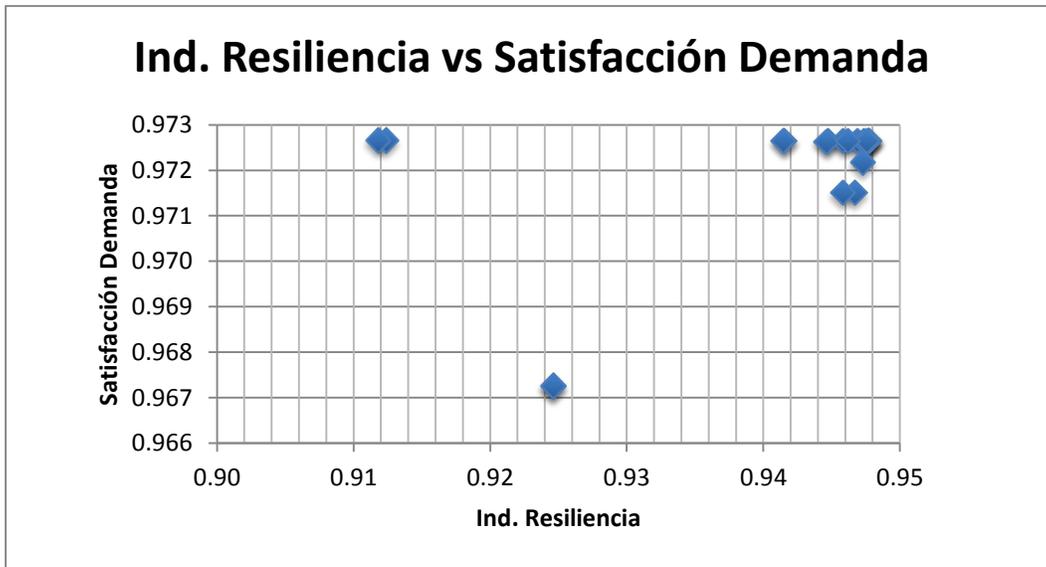


Figura 98. Ind. Resiliencia vs Satisfacción de demanda.

Con la tasa de satisfacción de la demanda se presentó la misma situación que con el índice de falla; a pesar de existir casos con alta resiliencia, este indicador mostró una reducción en la confiabilidad.

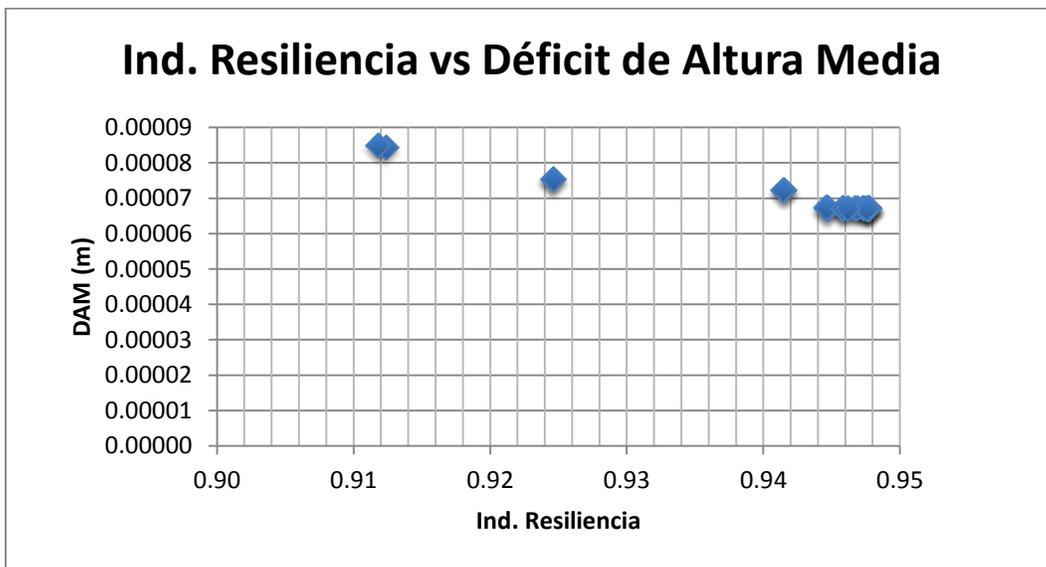


Figura 99. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media.

Al analizar el déficit de altura media y su relación con el índice de resiliencia se encontró una relación prácticamente lineal. Sin embargo, como ya se ha mencionado, el hecho de que exista un déficit de altura media diferente a 0 en circunstancias de alta resiliencia evidencia la diferencia entre esta característica y la confiabilidad.

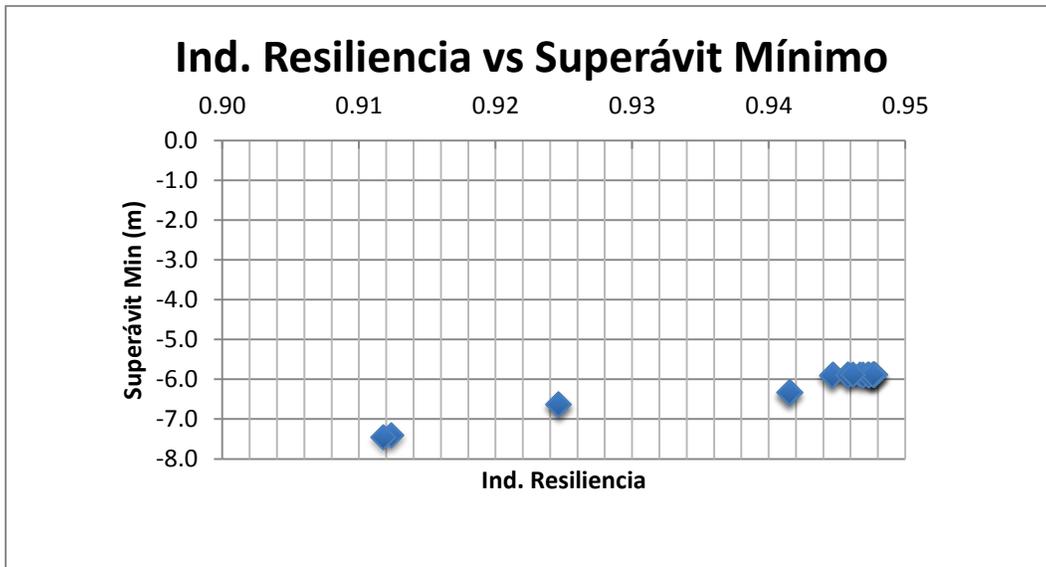


Figura 100. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo.

En la Figura 100 se observa la relación entre el índice de resiliencia y el Mínimum Surplus. Con este indicador se presentó la misma situación que con el déficit de presiones.

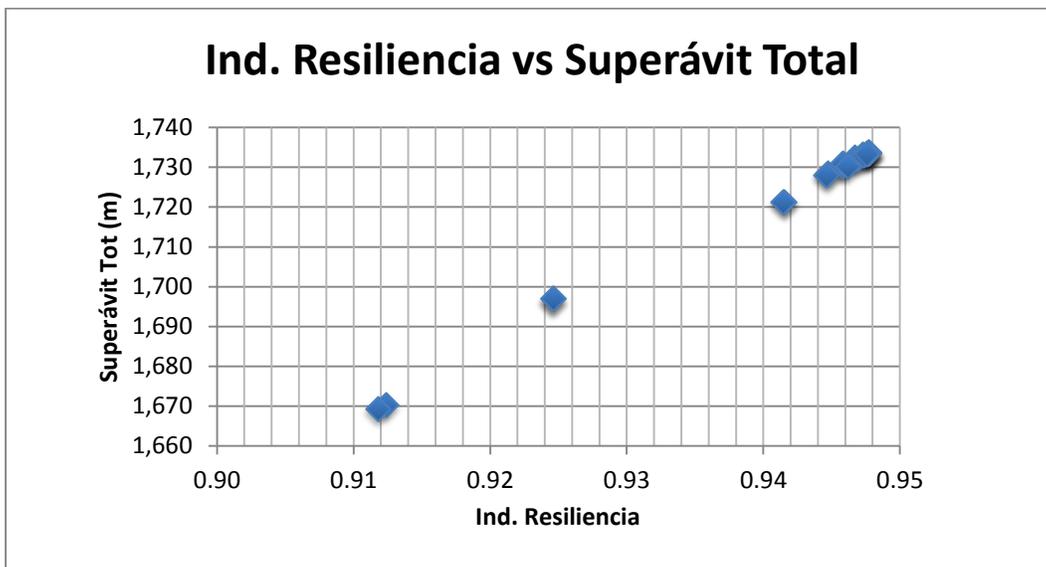


Figura 101. Ind. Resiliencia vs Superávit Total.



## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos para todas las redes, se realizó un análisis del comportamiento de cada índice versus el índice de resiliencia; adicionalmente tras analizar el comportamiento encontrado en algunas simulaciones, se realizaron comparaciones entre algunos índices utilizados, sin incluir el de resiliencia.

### 7.1 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS ÍNDICE DE RESILIENCIA DE LA RED

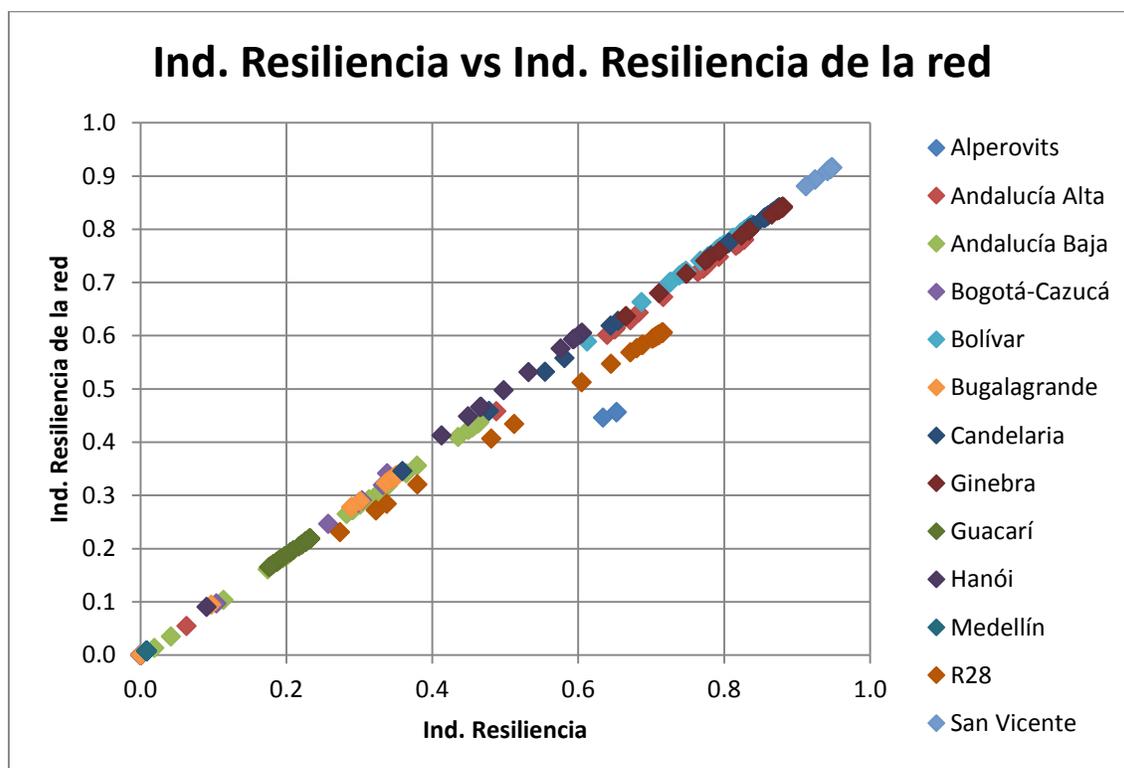


Figura 103. Ind. Resiliencia vs Ind. Resiliencia de la red para todas las redes.

Es necesario mencionar, como ya se hizo anteriormente, que el índice de resiliencia de la red siempre presenta valores levemente inferiores, debido a la redundancia de diámetros en la red. A pesar de que esta redundancia tiene un efecto en la resiliencia de la red, utilizar cualquiera de estos índices representa una aproximación adecuada para cuantificar esta característica de la red.

Cuantificar la resiliencia de una red se debe considerar fundamental tanto para el diseño como para el análisis de estas, pues a pesar de que no representa la misma confiabilidad de una red, es una característica relevante que altera el funcionamiento de una RDAP.

## 7.2 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS ÍNDICE DE FALLA

A pesar de que inicialmente se dedujo que podía existir una relación directa entre los valores de resiliencia de una red y los valores del índice de falla, es decir que ante valores de resiliencia menores a 0.5, siempre se presentaban valores menores a uno para el otro indicador; al analizar los resultados obtenidos se desestimó esta deducción. En la Figura 104 se observa el comportamiento de estos dos índices en todas las redes.

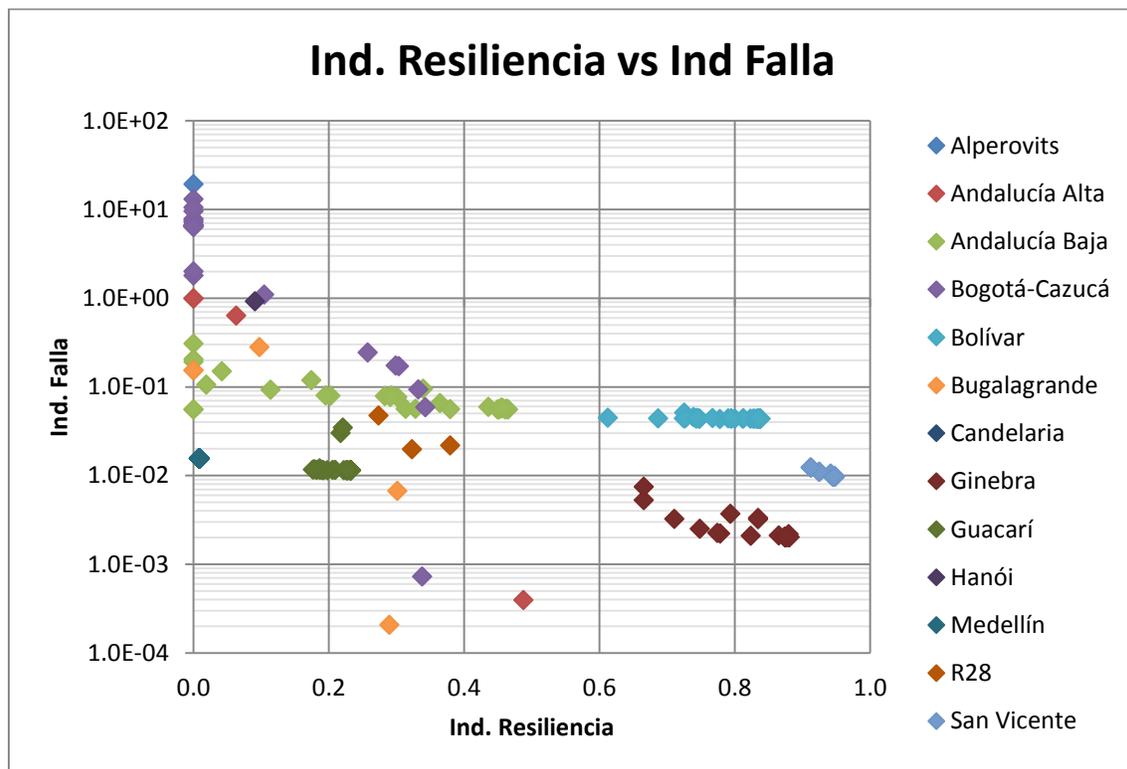


Figura 104. Ind. Resiliencia vs Ind. Falla para todas las redes.

A pesar de que se desestimó esta relación, la Figura 104 permite identificar una tendencia distinta entre estos índices. A medida que la resiliencia aumenta si existe una disminución en los valores del índice de falla; lo que se puede interpretar como la existencia de una relación proporcional entre la confiabilidad y la resiliencia de una red.

Como se mencionó brevemente en el capítulo anterior, los resultados que se obtuvieron permiten confirmar la suposición realizada por Todini; es decir que la resiliencia y la confiabilidad de una red son conceptos distintos; sin embargo, para aumentar la confiabilidad de una RDAP es deseable aumentar la resiliencia de la misma (Todini, 2000).

Esta diferencia entre confiabilidad y resiliencia, no resta validez a la comparación del índice de resiliencia con los otros indicadores utilizados; en cambio confirma la necesidad de utilizar más de un índice para evaluar redes de distribución de agua potable

### 7.3 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS TASA DE SATISFACCIÓN DE DEMANDA

Al igual que con el índice de falla, para la tasa de satisfacción de demanda los resultados obtenidos permitieron desestimar las suposiciones iniciales. A pesar de que existe una tendencia identificable entre este índice y la resiliencia de la red, esta es la misma que se presentó con el índice de falla:

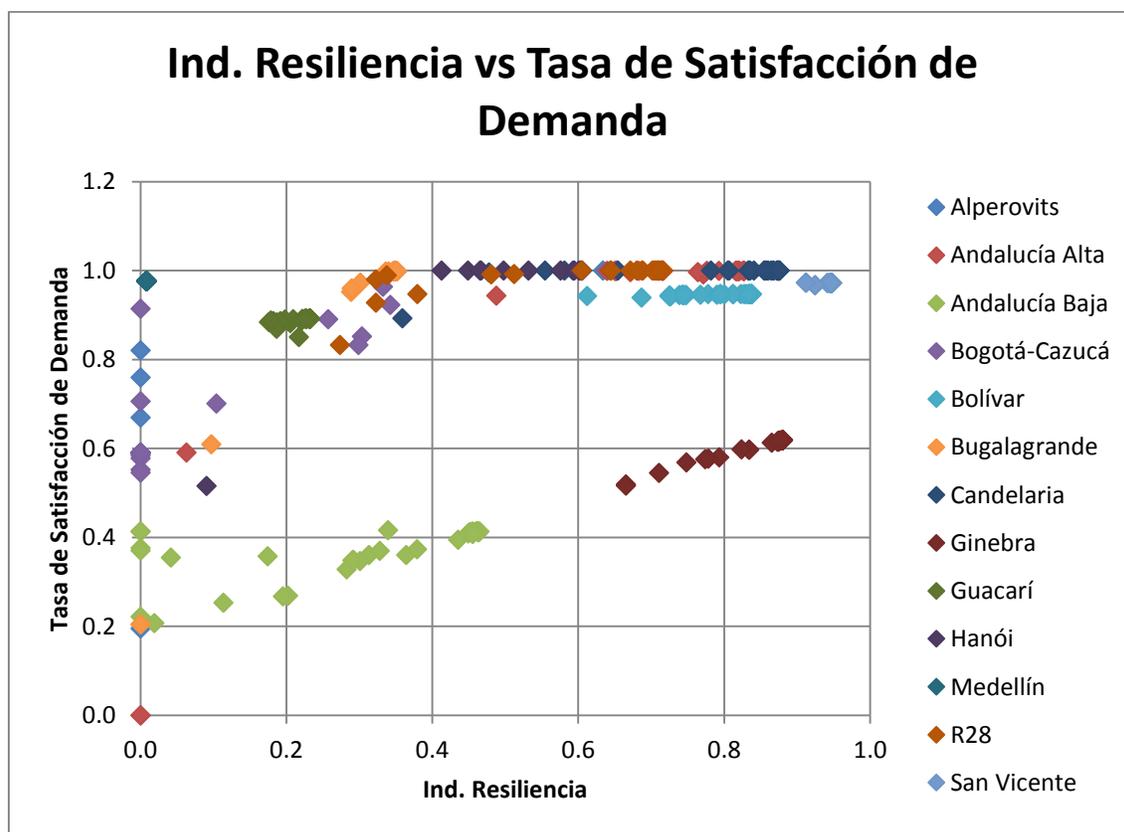


Figura 105. Ind. Resiliencia vs Tasa de Satisfacción de Demanda para todas las redes.

En la Figura 105 es posible observar cómo, a medida que la resiliencia de la red aumenta, los valores de la tasa de satisfacción también lo hacen; tal como sucedió con el índice de falla. A pesar de que en la figura anterior se pueden identificar dos grupos de datos (parte superior y parte inferior), esto no afecta lo que se afirmó previamente. Esta diferencia entre grupos se debe a las características de las redes utilizadas; a pesar de que la tendencia es la misma, es normal que los valores de cada índice cambien según la red que se utilice. Las series de datos que rompen el patrón son las de Ginebra y Andalucía Baja, cuyos casos se explicaron en los numerales 6.3 y 6.8.

Estos resultados ratifican la necesidad de utilizar dos indicadores al evaluar una RDAP ya que, para garantizar el correcto funcionamiento de esta, es necesario optimizar tanto la resiliencia como la confiabilidad. Y para poder realizar esto, dado que son conceptos distintos, es necesario emplear varios índices.

### 7.4 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS DÉFICIT DE ALTURA MEDIA

Inicialmente se supuso que la relación entre el índice de resiliencia y el déficit de presiones era directa y determinante. Es decir que se supuso que ante una ausencia de un déficit de presión, la resiliencia de una red siempre debía presentar valores superiores a 0.5. Sin embargo, como sucedió con los índices ya analizados, esta suposición fue desestimada por los resultados obtenidos.

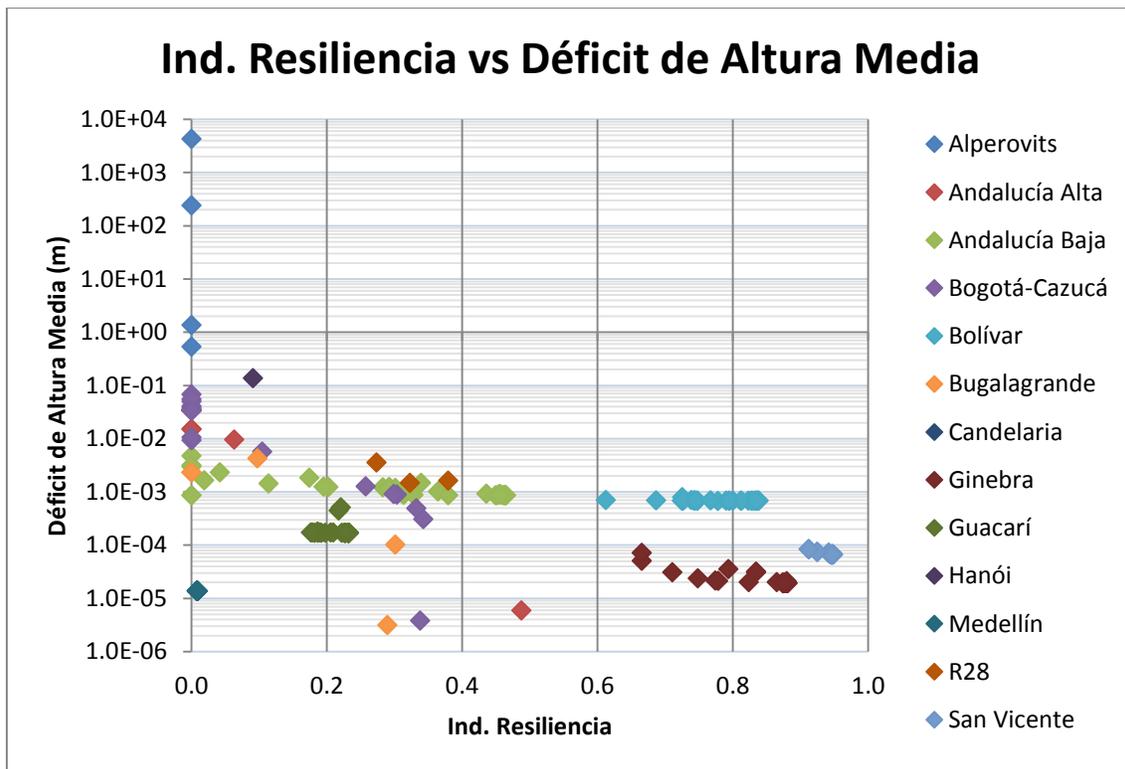


Figura 106. Ind. Resiliencia vs Déficit de Altura Media para todas las redes.

Como se observa en la Figura 106, incluso en condiciones donde el déficit presentó valores a cero se encontró una resiliencia alta en la red. A pesar de que se desestimó la suposición inicial, nuevamente se evidenció la relación entre resiliencia y confiabilidad; el déficit de altura media permitió observar nuevamente, que al aumentar la resiliencia de la red, la confiabilidad igualmente aumenta. En este caso, la confiabilidad se refleja en la disminución del déficit de presiones dentro del sistema, es decir en la capacidad de suplir plenamente la demanda de la red.

## 7.5 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS SUPERÁVIT MÍNIMO

Con el superávit mínimo, se presentó la misma situación que con el déficit de altura media; al aumentar el superávit mínimo de la red se presentó un aumento en la resiliencia de la misma, como se observa en la siguiente figura.

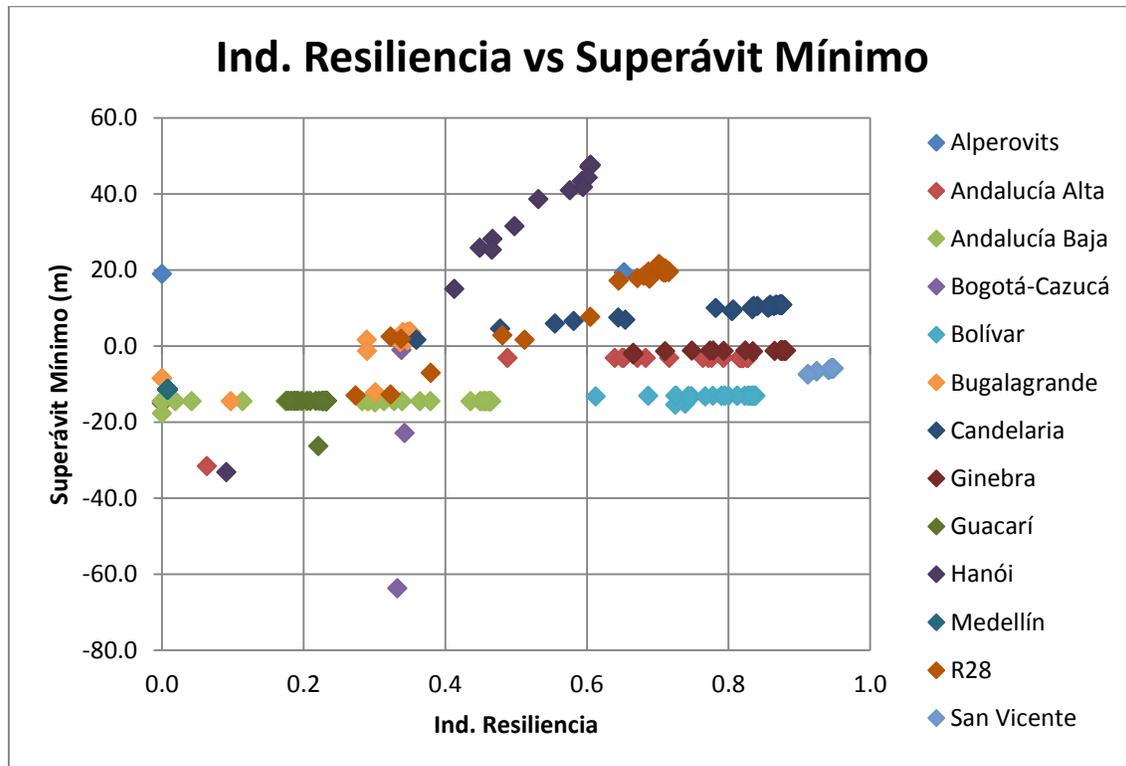


Figura 107. Ind. Resiliencia vs Superávit Mínimo para todas las redes.

Con respecto a este índice es necesario mencionar que en algunas de las redes utilizadas no presentaba variaciones en su valor. Esto se debe a que este indicador evalúa cada nudo localmente y lo compara con la situación global de la red; al hacer esto, si existe un nudo con una presión baja, que no se ve afectada por los cierres de algunas tuberías, a menos de que se presente otro nudo con una presión inferior, al evaluar el índice siempre se obtendrá el mismo valor. Esto se puede observar al analizar la Figura 107, en la cual dependiendo de la red que se analice, el valor del superávit mínimo presenta sea comportamientos constantes como comportamientos que varían con las simulaciones. A pesar de que esto no es un problema, igualmente debe ser tenido en cuenta cuando se utilice este índice, adicionalmente puede resultar útil para determinar nudos críticos al interior de la red.

## 7.6 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS SUPERÁVIT TOTAL

El superávit total presentó el mismo comportamiento en todas las redes analizadas al compararlo con el índice de resiliencia. Entre estos dos índices existe una relación directamente proporcional, es decir que a medida que se aumenta el superávit total también se aumenta la resiliencia de la red. En la Figura 108 se observa esta relación.

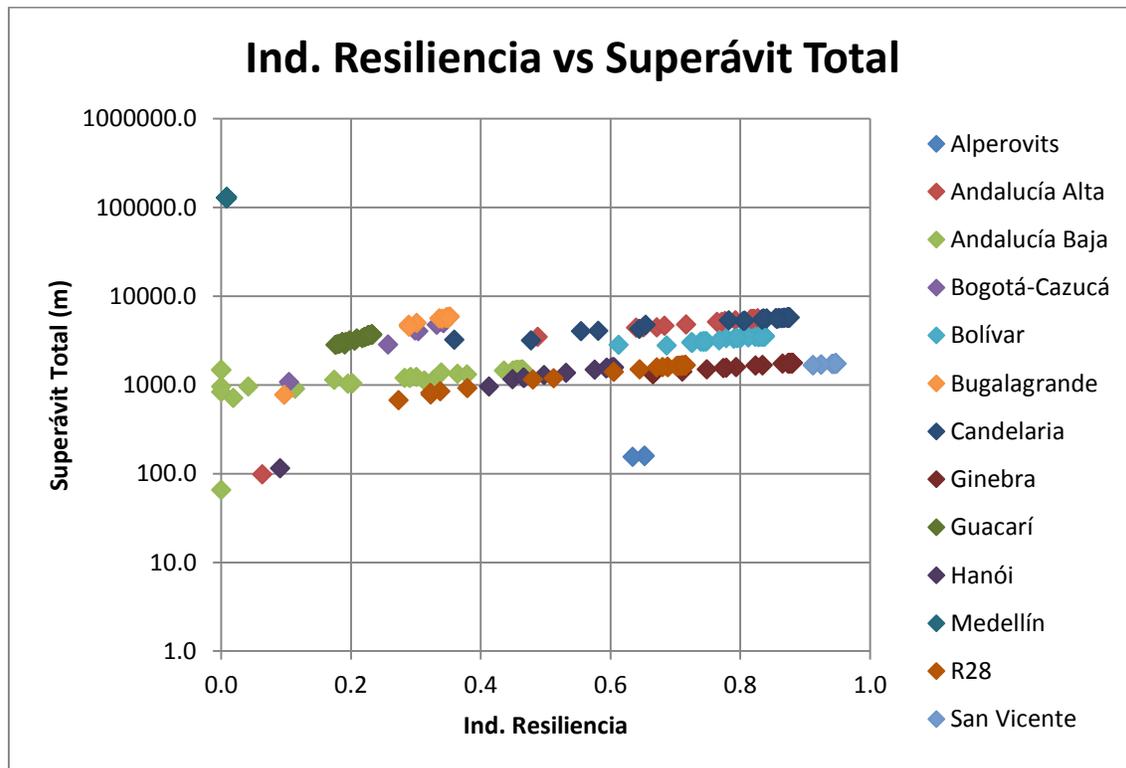


Figura 108. Ind. Resiliencia vs Superávit Total para todas las redes.

Esta relación se planteó desde el inicio de este proyecto debido a que es una de las suposiciones principales que Todini utilizó al desarrollar el concepto de resiliencia. A pesar de que al maximizar este superávit se debería presentar una situación óptima para una red, en cuanto a resiliencia y a confiabilidad, es necesario utilizarlo en conjunto con otros indicadores si se desea evaluar una red de distribución de agua potable.

## 7.7 ÍNDICE DE RESILIENCIA VS POTENCIA ESPECÍFICA

La siguiente relación analizada fue la presente entre la potencia específica de una red y el índice de resiliencia. Para estos indicadores se encontró un aumento en la resiliencia que correspondía a una disminución en la potencia específica; sin embargo, también se encontró que en la mayor parte de

los casos la potencia específica presentaba variaciones muy pequeñas entre las simulaciones que se realizaban.

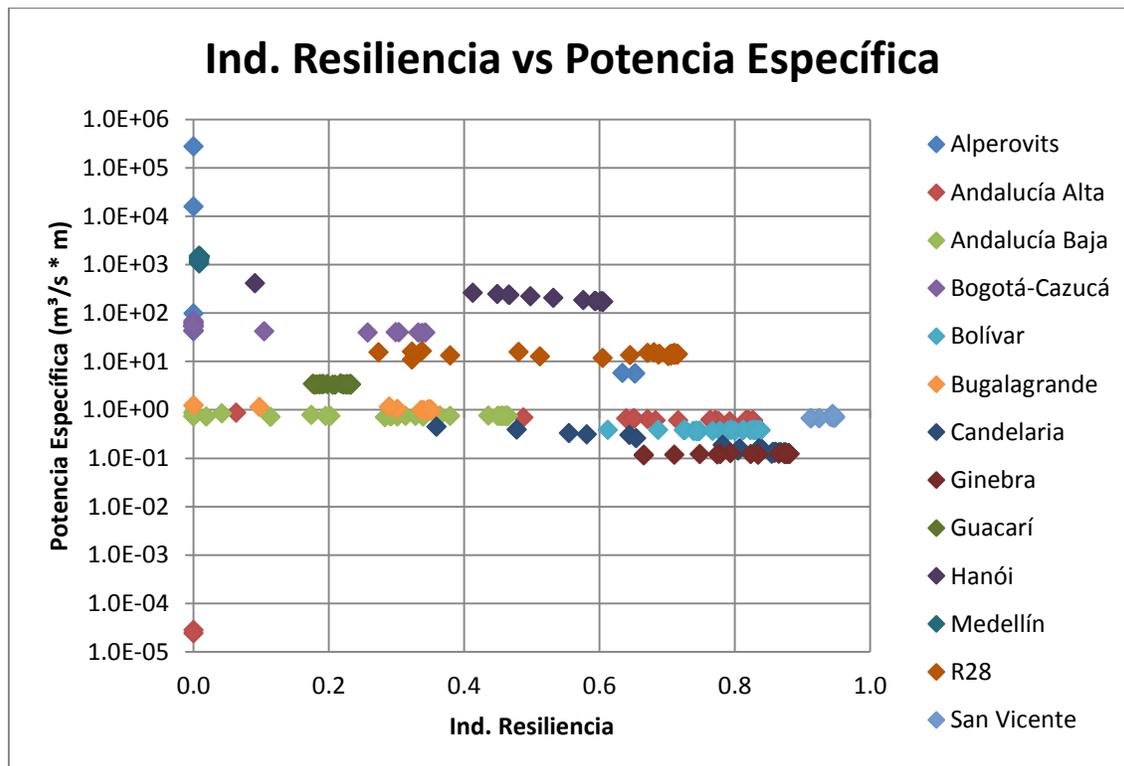


Figura 109. Ind. Resiliencia vs Potencia Específica para todas las redes.

En la Figura 109 es posible observar el comportamiento que se mencionó anteriormente. Con respecto a la potencia específica es necesario concluir que, a pesar de que presenta una relación con la resiliencia y la confiabilidad de una red, si se desea evaluar la confiabilidad de ésta, no es apropiado utilizar únicamente este indicador. Es decir que, al utilizar la potencia específica como un índice de confiabilidad, es recomendable utilizar algún otro indicador para realizar una evaluación adecuada.

## 7.8 DÉFICIT DE ALTURA MEDIA VS ÍNDICE DE FALLA

A raíz de la diferencia que se encontró entre confiabilidad y resiliencia, se decidió comparar los tres índices de confiabilidad que se consideraron más relevantes, es decir el déficit de altura media, el índice de falla y la tasa de satisfacción de la demanda. Esto se realizó para determinar la existencia de una relación entre éstos y determinar cuál es el más adecuado al evaluar confiabilidad. En primer lugar se presenta la relación entre el déficit de altura media y el índice de falla.

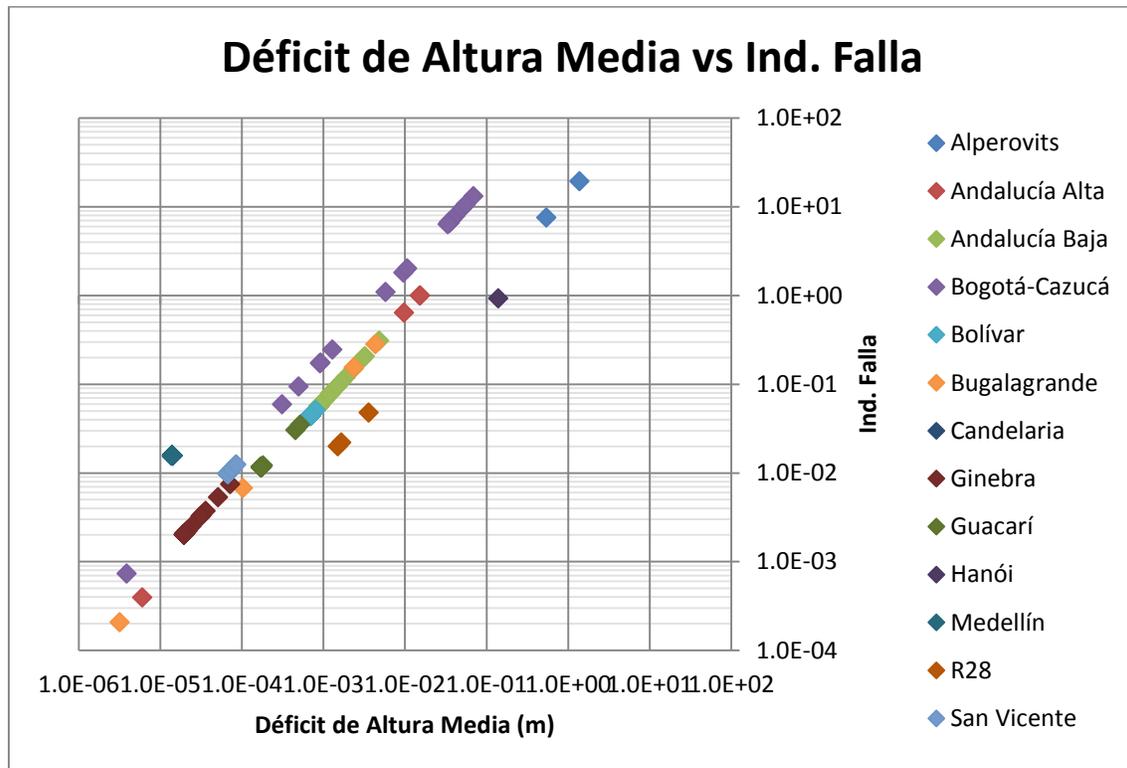


Figura 110. Déficit de Altura Media vs Ind. Falla para todas las redes.

Como se observa en la Figura 110, entre estos dos índices se encontró una relación prácticamente lineal; al aumentar el déficit de presiones de la red el índice de falla presentó valores cada vez mayores. Esta relación refleja la importancia de satisfacer los requisitos mínimos de funcionamiento de una red para ser considerada confiable, recordando la definición propuesta de confiabilidad. A partir de esta relación es posible concluir que al utilizar cualquiera de estos indicadores es posible evaluar la confiabilidad de una red.

### 7.9 DÉFICIT DE ALTURA MEDIA VS TASA DE SATISFACCIÓN DE DEMANDA

Por último se analizó la relación entre el déficit de altura media y la tasa de satisfacción de demanda. En este caso se encontró que al aumentar el déficit de presión en una red, la tasa de satisfacción presentaba valores cada vez más cercanos a cero; situación que se asemeja a la encontrada en la Sección 7.8.

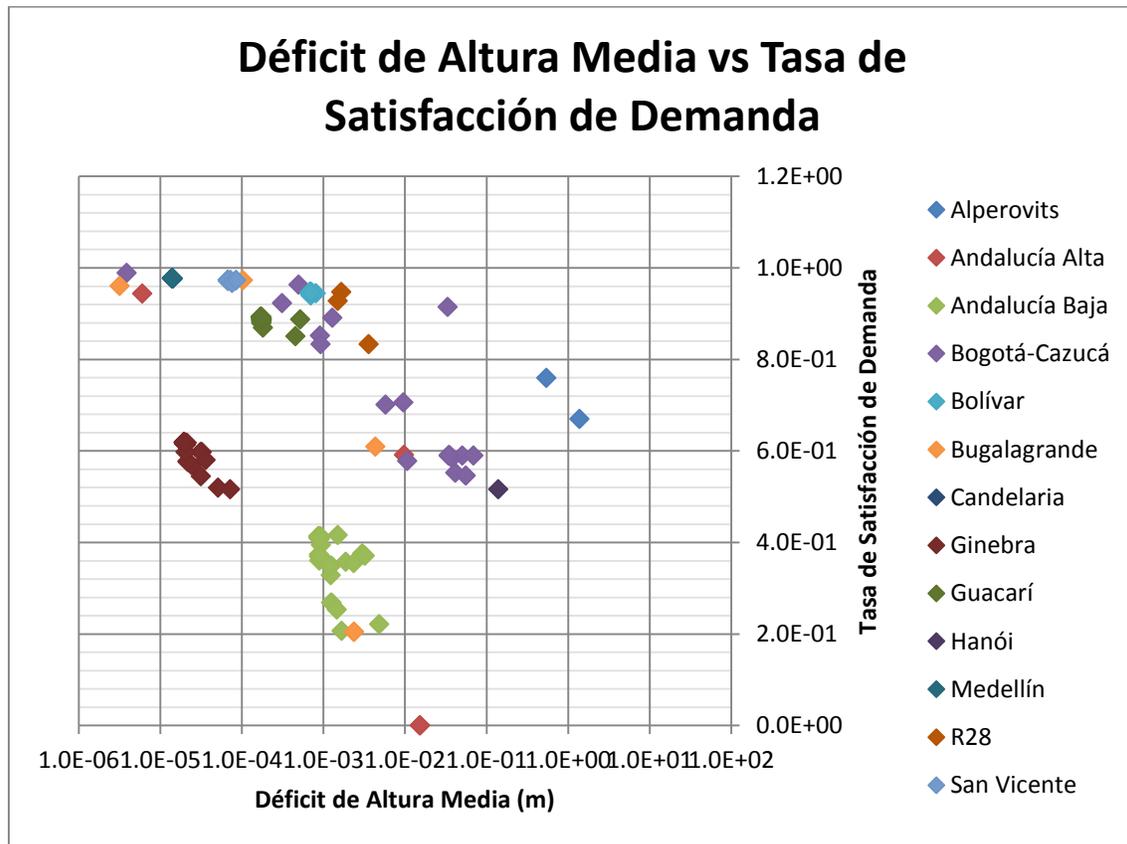


Figura 111. Déficit de Altura Media vs Tasa de Satisfacción de Demanda para todas las redes.

En la Figura 111 se observa la relación descrita previamente, adicionalmente es posible evidenciar que, a diferencia de lo ocurrido con el índice de falla, al comparar la tasa de satisfacción de la demanda con el déficit de altura media existe una dispersión mayor de los datos y no existe una tendencia lineal entre estos indicadores. Debido a esta dispersión es posible concluir que, para evaluar la confiabilidad de una RDAP, es recomendable utilizar el índice de falla o el déficit de presiones. Esto no significa que la tasa de satisfacción de demanda no sea útil al evaluar dicha característica, simplemente los otros indicadores tienen un comportamiento más adecuado.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y de su análisis, fue posible plantear las siguientes conclusiones para el presente proyecto. Adicionalmente se plantean una serie de recomendaciones para futuros análisis y para la evaluación de la confiabilidad de una RDAP.

### 8.1 CONCLUSIONES

- Es necesario mencionar que tanto las simulaciones realizadas, como los resultados encontrados, confirman la diferencia fundamental que existe entre los conceptos de resiliencia y de confiabilidad de una RDAP. Mientras que la resiliencia hace referencia a la capacidad de una red de sobreponerse a una falla, la confiabilidad hace referencia a la capacidad de una red de suplir una serie de requisitos mínimos.
- A pesar de la diferencia conceptual entre confiabilidad y resiliencia, se debe aceptar que existe una relación entre estas características. Como se observó al analizar los distintos índices utilizados, a medida que en una RDAP es posible aumentar la resiliencia, esto se verá reflejado en un aumento de la confiabilidad.
- Tanto la resiliencia como la confiabilidad son características fundamentales de una RDAP. Considerando su importancia en la sociedad actual y para los seres humanos, resulta necesario evaluar y optimizar ambas características.
- Entre los índices utilizados, se encontró que una parte de estos únicamente cuantifica la resiliencia de la red; mientras que la otra parte cuantifica exclusivamente la confiabilidad.
- A partir de los resultados encontrados y de las conclusiones anteriores, se determinó que en vez de seleccionar un único índice para evaluar la confiabilidad de una red, es necesario utilizar una combinación de estos.
- Entre los índices utilizados en este proyecto, se encontró que los más adecuados para evaluar la confiabilidad de una red son el Índice de Falla y el déficit de altura media. Estos indicadores presentaron el comportamiento más estable y los resultados más consistentes en las simulaciones realizadas para cada red.
- Para la cuantificación de la resiliencia de una red, a pesar de que el índice de resiliencia y el índice de resiliencia de la red, presentaron un comportamiento muy similar, se determinó que el índice de resiliencia es el más adecuado. Esto se debe, principalmente, a que la modificación presentada por Todini permite utilizar este indicador en circunstancias donde la presión es la variable principal (Pressure Driven Problems).
- En cuanto al índice de resiliencia, la metodología desarrollada permitió comprobar su validez al evaluar una RDAP. A través de los resultados obtenidos, en primer lugar, fue posible comprobar las suposiciones realizadas para su desarrollo (relación entre el superávit de energía una red y la resiliencia de la misma). Y en segundo lugar se determinó que, tras la modificación presentada (Todini, 2015), este indicador puede utilizarse prácticamente sin ninguna restricción; lo cual lo convierte en una herramienta fundamental e indispensable al evaluar una red de distribución de agua potable.
- Al utilizar el índice de resiliencia y el índice de falla (o el déficit de altura media) simultáneamente es posible evaluar, adecuadamente, la confiabilidad y resiliencia de una

red. Al ser estas características fundamentales para el correcto funcionamiento de una red, como se mencionó anteriormente, resulta indispensable tenerlas tanto en el momento de evaluar una red como al momento de diseñar una RDAP. Por esta razón, los resultados de esta investigación podrían ser utilizados en procedimientos de diseño; de esta forma se podrían comparar diseños utilizando el concepto de resiliencia o confiabilidad con diseños que utilicen ambos conceptos.

Teniendo en cuenta los resultados y las conclusiones que se obtuvieron, resultaría adecuado desarrollar una investigación que permita unificar los conceptos de resiliencia y de confiabilidad, de tal manera que estas características puedan evaluarse y optimizarse simultáneamente.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda incluir en futuros análisis un mayor número de índices, tanto de confiabilidad como de resiliencia.
- Es recomendable repetir este procedimiento utilizando redes con diferentes características; de esta manera se crearía una base de datos más amplia, que permitiría estandarizar o regular el uso de algún índice sobre los demás.
- Como se mencionó anteriormente, es recomendable extender la presente investigación hacia la búsqueda de un índice que evalúe tanto confiabilidad como resiliencia y que permita unificar estos conceptos.
- Por último, se recomienda utilizar más de un índice para evaluar una RDAP. Como se mencionó anteriormente, la alternativa más adecuada es utilizar un índice de confiabilidad y un índice de resiliencia en este proceso.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, S., Farmani, R., Memon, F., & Butler, D. (2014). Reliability indicators for water distribution systems design: Comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management @ASCE*, 160-168.
- Creaco, E., Fortunato, A., Franchini, M., & Mazzola, M. (2014). Comparison between entropy and resilience as indirect measure of reliability in the framework of water distribution network design. *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, (págs. 379-388).
- Creaco, E., Franchini, M., & Todini, E. (2014). The combined use of resilience and loop diameter uniformity as a good indirect measure of network reliability. *Urban Water Journal*.
- Di Nardo, A., Greco, R., & Santonastaso, G. (s.f.). *Synthetic indices of robustness of water distribution networks*. Napoli.
- Maglionico, M., & Ugarelli, R. (s.f.). *Reliability of a water supply system in quantity and quality terms*. Universidad de Boloña, Boloña.
- Mays, L. (s.f.). *The role of risk analysis in water resources engineering*. Arizona State University.
- Prasad, T., & Park, N. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 73-82.
- Prasad, T., Hong, S.-H., & Park, N. (2003). Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 351-361.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá D.C: Alfaomega.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Cortés, Ó. (2010). Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*, 7-15.
- Shuang, Q., Zhang, M., & Yuan, Y. (2014). Performance and reliability analysis of water distribution systems under cascading failures and the identification of crucial pipes. *PLOS One*.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *UrbanWater*, 115-122.
- Todini, E. (2015). *Extending the Resilience Index to Pressure Driven Problems*.