



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

LA CAPACIDAD HIDRÁULICA EN LAS REDES DE AGUA
POTABLE Y SU INFLUENCIA EN EL PROCESO DE
SECTORIZACIÓN

TESIS DOCTORAL

Autor:

Ing. Carlos Martins Alves

Dirigida por:

Dr. Enrique O. Campbell González

Dr. Amilkar Ilaya Ayza

Prof. Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Valencia, diciembre 2020

(página en blanco)

El agua es la fuerza motriz de la naturaleza”
Leonardo da Vinci

(página en blanco)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dedico este trabajo a la memoria de mi padre Manuel, donde estés pienso que me acompañas.

Agradezco a mi madre y hermanas por todo el cariño y apoyo, a pesar de la distancia permanente.

A mi esposa Viana por soportarme en los malos momentos y continuar siempre allí, gracias por amarme.

A mis hijos Manuel y Daniel, mis tesoros.

A los compañeros del doctorado, del equipo Flulng, realmente me mostraron lo que es un equipo y como cooperar para alcanzar los logros.

Al profesor Rafael Pérez García (Q.E.P.D.), que a pesar de haber compartido muy poco tiempo, me dio la oportunidad de ingresar al doctorado.

A mis directores, Dr. Enrique Campbell y Dr. Amilkar Ilaya, por su colaboración con sus conocimientos técnicos y sus consejos.

Y, por último, pero más importante, al Profesor Joaquín Izquierdo, por su amistad, por su apoyo moral invaluable; siempre con consejos y palabras de ánimo cuando parecían que las cosas no iban bien. Me considero muy afortunado por haberlo conocido.

(página en blanco)

RESUMEN

La sectorización en sectores hidrométricos de las redes de abastecimiento de agua potable ha sido, a lo largo de los últimos años, una de las técnicas más empleadas para ubicar y controlar las fugas. Esto es de vital importancia ante un recurso, el agua potable, cada vez más escaso y valioso. Sin embargo, el empleo de esta técnica, algunas veces, es llevada a cabo por ensayo y error, o sin una estrategia previamente establecida.

La capacidad hidráulica de la red, o caudal máximo que puede aportar cumpliendo los requisitos mínimos de servicio, puede afectarse cuando se lleva a cabo un proceso de sectorización. Esto es debido a que el cierre de tramos de la red cambia las condiciones de servicio, pudiendo generar afectaciones graves desde el punto de vista de presiones y de calidad de agua. Algunas veces, también, es aplicado el proceso de sectorización sin una evaluación previa de las características de la red y de las condiciones operativas.

Partiendo de estas situaciones, se planteó indagar acerca de cómo las condiciones iniciales de operación de la red pudiesen afectar la formación de los sectores hidrométricos desde el punto de vista de su configuración.

En los procesos de sectorización pueden emplearse algoritmos de clústering debido a la analogía existente entre los agrupamientos de los diferentes elementos de los sistemas de abastecimiento de agua y los principios aplicados en las técnicas de agrupamiento de datos. Así, se decidió aplicar diversas técnicas basadas en la detección de comunidades en redes, ya que poseen la ventaja de agrupar en función de la información en las conexiones, y no solo en la información almacenada en los nodos, lo cual resulta favorable para el tema en estudio en este trabajo, debido a que pudiera tomarse en cuenta cómo la variación de los niveles de exigencia en las tuberías, ocasionados por la variación en la demanda, afectaría la formación de sectores. Para ello se planteó trabajar con dos redes de prueba conocidas en la literatura, a las cuales se les simuló bajo distintas capacidades de carga de trabajo y a través del empleo de varios algoritmos de agrupamiento, tales como *Infomap*, *Walktrap*, *Fast greedy*, *Edge betweenness*, *Luovain* y *Leiden*. La metodología desarrollada fue, finalmente, aplicada a una red real de gran tamaño, lo que valida dicha metodología para un problema del mundo real.

Como parámetros para ponderar las conexiones se probaron cuatro opciones: caudal circulante con la red trabajando a la capacidad deseada; energía disipada en cada tramo con la red trabajando a la capacidad deseada; relación entre el caudal circulante en el tramo y el caudal circulante a capacidad máxima teórica de la red; y relación entre la energía disipada trabajando a la capacidad deseada y la disipación de la energía en los tramos con la red trabajando a capacidad máxima.

Obtenida la partición por cualquiera de los métodos anteriormente expuestos, se optimizaron las entradas y salidas de los sectores por medio de la implementación de un algoritmo de enjambre de partículas; adicionalmente, se hace una comparación del resultado con otro obtenido a partir de un algoritmo de colonia de hormigas, lo que permite dar robustez a la metodología desarrollada.

(página en blanco)

ABSTRACT

Partitioning or sectorization of drinking water supply networks into so-called district metered areas has been, over the last years, one of the most used techniques to locate and control leaks. Sectorization is crucial when dealing with an increasingly scarce and valuable resource as water. However, the use of this technique is sometimes carried out by trial and error, or without a previously established strategy.

The hydraulic capacity of a network, or the maximum flow it can provide while meeting the minimum service requirements, can be affected when a sectorization process is carried out. This is due to the fact that the closure of sections of the network changes the service conditions, which could generate serious effects from the point of view of pressure and water quality. Also, sometimes sectorization processes are applied without a prior evaluation of the characteristics of the network and of the operating conditions.

Starting from these situations, we inquired about how the initial operating conditions of the network could affect the construction of the hydrometric sectors or district metered areas from the point of view of their configuration.

Clustering algorithms can be used in sectorization processes due to the analogy between the grouping of the different elements of water supply systems and the principles applied in data grouping techniques. Thus, we decided to apply various techniques based on the detection of communities in networks, since they have the advantage of performing grouping based on the information at the junctions, and not only on the information stored at the nodes. This is favourable for the subject under study in this work, because one may consider how the variation of the demand levels in the pipes, caused by the demand variation, can affect the construction of sectors.

To this end, it was proposed to work with two test networks known in the literature, which were simulated under different load capacities and through the use of various clustering algorithms, namely Infomap, Walktrap, Fast greedy, Edge betweenness, Luovain and Leiden. The methodology developed was, finally, applied to a large real network, which validates the methodology for a real-world water supply network.

As parameters to weight the junctions, four options were tested: circulating flow with the network working at the desired capacity; energy dissipated in each section with the network working at the desired capacity; relationship between the circulating flow in the section and the circulating flow at the theoretical maximum capacity of the network; and the relationship between the energy dissipated working at the desired capacity and the dissipation of energy in the sections with the network working at maximum capacity.

Once the partition is obtained by any of the previously said methods, the inputs and outputs of the sectors are optimized by using a particle swarm optimization algorithm; additionally, a comparison of the result is made with another optimization algorithm, namely, an ant colony optimization algorithm, which allows to provide robustness to the developed methodology.

(página en blanco)

RESUM

La partició o sectorització de les xarxes d'abastiment d'aigua potable a les anomenades districtes hidromètrics ha estat, durant els darrers anys, una de les tècniques més utilitzades per localitzar i controlar les pèrdues d'aigua. La sectorització és crucial quan es tracta d'un recurs cada vegada més escàs i valuós com és l'aigua. Tanmateix, l'ús d'aquesta tècnica de vegades es duu a terme mitjançant proves i errors, o sense una estratègia prèviament establerta.

La capacitat hidràulica d'una xarxa o el cabal màxim que pot proporcionar mentre compleix els requisits mínims de servei es pot veure afectat quan es realitza un procés de sectorització. Això es deu al fet que el tancament de seccions de la xarxa modifica les condicions del servei, la qual cosa pot generar greus efectes des del punt de vista de la pressió i la qualitat de l'aigua. A més, de vegades s'apliquen processos de sectorització sense una avaluació prèvia de les característiques de la xarxa i de les condicions de funcionament.

Partint d'aquestes situacions, ens vam preguntar sobre com les condicions inicials de funcionament de la xarxa podrien afectar la construcció dels sectors hidromètrics des del punt de vista de la seva configuració.

Els algorismes de clusterització es poden utilitzar en processos de sectorització a causa de l'analogia entre l'agrupació dels diferents elements dels sistemes d'abastiment d'aigua i els principis aplicats en les tècniques d'agrupament de dades. Així, vam decidir aplicar diverses tècniques basades en la detecció de comunitats a les xarxes, ja que tenen l'avantatge de realitzar agrupacions basades en la informació de les unions i no només en la informació emmagatzemada als nodes. Això és favorable per al tema en estudi en aquest treball, perquè es pot considerar com la variació dels nivells de demanda a les canonades, causada per la variació de la demanda, pot afectar la construcció de sectors.

Amb aquesta finalitat, es va proposar treballar amb dues xarxes de proves conegudes a la literatura, que es van simular sota diferents capacitats de càrrega i mitjançant l'ús de diversos algorismes de clusterització, com *Infomap*, *Walktrap*, *Fast greedy*, *Edge betweenness*, *Luovain* i *Leiden*. La metodologia desenvolupada es va aplicar, finalment, a una gran xarxa real, que valida la metodologia per a una xarxa de subministrament d'aigua del món real.

Com a paràmetres per ponderar les unions, es van provar quatre opcions: cabal circulant amb la xarxa treballant a la capacitat desitjada; energia dissipada a cada secció amb la xarxa treballant a la capacitat desitjada; relació entre el cabal circulant a la secció i el cabal circulant a la capacitat màxima teòrica de la xarxa; i la relació entre l'energia dissipada que treballa a la capacitat desitjada i la dissipació d'energia a les seccions amb la xarxa que treballa a la màxima capacitat. Un cop obtinguda la partició per qualsevol dels mètodes esmentats anteriorment, les entrades i sortides dels sectors s'optimitzen mitjançant un algorisme d'optimització d'eixam de partícules; a més, es fa una comparació del resultat amb un altre algorisme d'optimització, és a dir, un algorisme d'optimització de colònies de formigues, que permet proporcionar robustesa a la metodologia desenvolupada.

(página en blanco)

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
RESUM	XI
ÍNDICE DE CONTENIDO	XIII
LISTA DE ILUSTRACIONES	XVII
LISTA DE TABLAS	XXI
LISTA DE ABREVIATURAS	XXIII
1. INTRODUCCIÓN	25
1.1. PREÁMBULO.....	27
1.2. JUSTIFICACIÓN	29
1.3. OBJETIVOS	29
1.4. METODOLOGÍA	30
1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	32
2. LA SECTORIZACIÓN DE REDES	33
2.1 ORÍGENES Y PRINCIPIOS DE LA SECTORIZACIÓN.....	35
2.2 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE LOS SECTORES.....	38
2.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA SECTORIZACIÓN	40
2.4 ETAPAS EN EL PROCESO DE SECTORIZACIÓN	41
2.5 ESTADO DEL ARTE EN LA SECTORIZACIÓN	42
3. LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS REDES	49
3.1 IMPORTANCIA DE LOS INDICADORES DE CAPACIDAD	51
3.2 INDICADORES PARA LA ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA CAPACIDAD	52
3.2.1 <i>La entropía</i>	56
3.2.2 <i>Índice de resiliencia</i>	57
3.3 LA CURVA DE CONSIGNA	58
3.3.1 <i>La curva de sistema</i>	59
3.3.2 <i>Descripción de la curva de consigna</i>	63
3.3.2.1 Metodología para la determinación de la curva de consigna bajo Análisis Dependiente de la Demanda (DDA)	66
3.3.2.2 Metodología para la determinación de la curva de consigna bajo Análisis de Dependiente de la Presión (PDD).....	68
3.3.3 <i>Caudal máximo teórico</i>	70
3.4 CAUDAL MÁXIMO TEÓRICO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE RESILIENCIA	71
4. DETECCIÓN DE COMUNIDADES	75
4.1 GRAFOS.....	77
4.2 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS	79
4.2.1 <i>Lista de adyacencia</i>	79
4.2.2 <i>Matriz de adyacencia</i>	79
4.2.3 <i>Matriz de incidencia</i>	80
4.3 COMUNIDADES	81
4.4 MEDIDAS EN COMUNIDADES.....	83

4.4.1 Medidas relacionadas con la distancia	84
4.4.2 Medidas relacionadas con el coeficiente de agrupamiento.....	84
4.4.3 Medidas basadas con la centralidad o importancia	85
4.4.4 Medidas basadas en la modularidad.....	87
4.5 MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE COMUNIDADES	87
4.5.1 Algoritmo fast greedy.....	90
4.5.2 Algoritmo edge betweeness	91
4.5.3 Algoritmo Louvain.....	92
4.5.4 Algoritmo walktrap.....	93
4.5.5 Algoritmo infomap.....	94
4.5.6 Algoritmo Leiden.....	95
5. DETERMINACIÓN DE SECTORES APLICANDO ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE COMUNIDADES	97
5.1 RED DE FOSSOLO.....	99
5.2 DETECCIÓN DE SECTORES CON INFORMACIÓN EN LAS ARISTAS.....	101
5.2.1 Peso 1: Caudal circulante con red funcionando a capacidad deseada	103
5.2.2 Peso 2: Energía disipada con red funcionando a capacidad deseada.....	111
5.2.3 Peso 3: Relación de caudal circulante y caudal circulante a capacidad máxima teórica.....	119
5.2.4 Peso 4: Relación de la energía disipada trabajando a la capacidad deseada entre el inverso de la energía disipada con la red trabajando a capacidad máxima	127
5.3 DETERMINACIÓN DE COSTOS DE IMPLANTACIÓN	135
5.4 RED DE BALERMA.....	144
6. CONTROL DE PÉRDIDAS	161
6.1 BALANCE DE AGUA.....	164
6.2 METODOLOGÍA BURST AND BACKGROUND ESTIMATES (BABE)	166
6.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN GLOBAL	166
6.4 CÁLCULO POR FUGA	167
6.5 USO DE VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE FUGAS EN SECTORES.....	168
7. APLICACIÓN A LA RED DE CORO, ESTADO FALCÓN, VENEZUELA	173
8. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA	185
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PROPIAS.....	200

(página en blanco)

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. ESQUEMA DE SECTORIZACIÓN	36
ILUSTRACIÓN 2. ESQUEMA DE VISTO DE PERFIL DE UNA ADUCCIÓN POR BOMBEO	60
ILUSTRACIÓN 3. CURVA DE SISTEMA MOSTRADO EN LA FIGURA 2	60
ILUSTRACIÓN 4. ESQUEMA VISTO DE PERFIL DE UNA ADUCCIÓN POR BOMBEO.....	61
ILUSTRACIÓN 5. CURVA RESISTENTE DE SISTEMA MOSTRADO EN LA FIGURA 3	62
ILUSTRACIÓN 6. CURVA RESISTENTE DE SISTEMA PARA DISTINTOS GRADOS DE APERTURA DE VÁLVULA	62
ILUSTRACIÓN 7. CURVA RESISTENTE DE SISTEMA Y CURVA DE BOMBEO.....	63
ILUSTRACIÓN 8. COMPARATIVA CURVA DE MODULACIÓN Y CURVAS DE SISTEMA.....	64
ILUSTRACIÓN 9. COMPARATIVA DE CURVAS	65
ILUSTRACIÓN 10. PSEUDO CÓDIGO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA RED BAJO ENFOQUE DDA.....	67
ILUSTRACIÓN 11. PSEUDO CÓDIGO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA RED BAJO ENFOQUE PDD	69
ILUSTRACIÓN 12. COMPARATIVA CURVA DE MODULACIÓN Y CURVAS DE SISTEMA	70
ILUSTRACIÓN 13. RED DE PRUEBA DE ILAYA	71
ILUSTRACIÓN 14. GRUPO DE CURVAS DE CONSIGNA DE RED DE ILAYA.....	72
ILUSTRACIÓN 15. COMPARATIVA IR DE DDA Y PDD RED DE ILAYA	73
ILUSTRACIÓN 16. EJEMPLOS DE GRAFO DIRIGIDO Y NO DIRIGIDO	78
ILUSTRACIÓN 17. MATRIZ DE ADYACENCIA DEL GRAFO DIRIGIDO DE LA ILUSTRACIÓN 16.....	79
ILUSTRACIÓN 18. MATRIZ DE ADYACENCIA DEL GRAFO NO DIRIGIDO DE LA ILUSTRACIÓN 16.....	80
ILUSTRACIÓN 19. MATRIZ DE INCIDENCIA DEL GRAFO DIRIGIDO DE LA ILUSTRACIÓN 16	81
ILUSTRACIÓN 20. ESQUEMA DE COMUNIDADES EN REDES.....	82
ILUSTRACIÓN 21. ESQUEMA DEMOSTRATIVO DE LOS MÉTODOS BÁSICOS DE DETECCIÓN DE COMUNIDADES	88
ILUSTRACIÓN 22. DENDOGRAMA TÍPICO	89
ILUSTRACIÓN 23. ESQUEMA DE LA RED DE FOSSOLO.....	100
ILUSTRACIÓN 24. PSEUDO CÓDIGO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS SECTORES EN LA RED DE FOSSOLO.....	102
ILUSTRACIÓN 25. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO FAST GREEDY CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	105
ILUSTRACIÓN 26. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO EDGE BETWEENESS CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	106
ILUSTRACIÓN 27. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO LOUVAIN CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	107
ILUSTRACIÓN 28. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO WALKTRAP CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	108
ILUSTRACIÓN 29. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO INFOMAP CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	109
ILUSTRACIÓN 30. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LEIDEN CON PESO 1 EN LAS ARISTAS	110
ILUSTRACIÓN 31. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO FAST GREEDY CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	113
ILUSTRACIÓN 32. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO EDGE BETWEENESS CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	114
ILUSTRACIÓN 33. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LOUVAIN CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	115
ILUSTRACIÓN 34. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO WALKTRAP CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	116
ILUSTRACIÓN 35. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO INFOMAP CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	117
ILUSTRACIÓN 36. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LEIDEN CON PESO 2 EN LAS ARISTAS	118
ILUSTRACIÓN 37. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO FAST GREEDY CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	121

ILUSTRACIÓN 38. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO EDGE BETWEENESS CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	122
ILUSTRACIÓN 39. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LOUVAIN CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	123
ILUSTRACIÓN 40. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO WALKTRAP CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	124
ILUSTRACIÓN 41. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO INFOMAP CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	125
ILUSTRACIÓN 42. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LEIDEN CON PESO 3 EN LAS ARISTAS	126
ILUSTRACIÓN 43. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO FAST GREEDY CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	129
ILUSTRACIÓN 44. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO EDGE BETWEENESS CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	130
ILUSTRACIÓN 45. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LOUVAIN CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	131
ILUSTRACIÓN 46. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO WALKTRAP CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	132
ILUSTRACIÓN 47. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO INFOMAP CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	133
ILUSTRACIÓN 48. SECTORES DETECTADOS EN LA RED DE FOSSOLO POR EL ALGORITMO DE LEIDEN CON PESO 4 EN LAS ARISTAS	134
ILUSTRACIÓN 49. PSEUDO CÓDIGO PARA LA OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN DE LA RED DE FOSSOLO	138
ILUSTRACIÓN 50. PESO 1 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE FOSSOLO	139
ILUSTRACIÓN 51. PESO 2 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE FOSSOLO	141
ILUSTRACIÓN 52. PESO 3 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE FOSSOLO	142
ILUSTRACIÓN 53. PESO 4 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE FOSSOLO	143
ILUSTRACIÓN 54. ESQUEMA DE LA RED DE BALERMA.....	144
ILUSTRACIÓN 55. RED DE BALERMA SECTORIZADA PARA TRABAJAR A 90 Y 95% DE SU CAPACIDAD	153
ILUSTRACIÓN 56. RED DE BALERMA SECTORIZADA PARA TRABAJAR A 100% DE SU CAPACIDAD	154
ILUSTRACIÓN 57. RED DE BALERMA SECTORIZADA PARA TRABAJAR A 105 % DE SU CAPACIDAD	155
ILUSTRACIÓN 58. PESO 1 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE BALERMA	155
ILUSTRACIÓN 59. PESO 2 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE BALERMA	156
ILUSTRACIÓN 60. PESO 3 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE BALERMA	157
ILUSTRACIÓN 61. PESO 4 COSTOS VS CAPACIDAD RED DE BALERMA	158
ILUSTRACIÓN 62. COMPONENTES DEL BALANCE DE AGUA.....	164
ILUSTRACIÓN 63. PSEUDO CÓDIGO PARA LA OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA INCLUYENDO CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS	169
ILUSTRACIÓN 64. MAPA DE UBICACIÓN DE CORO	175
ILUSTRACIÓN 65. RED DE ABASTECIMIENTO DE CORO	176
ILUSTRACIÓN 66. RED DE CORO SECTORIZADA CON PESO 1 EN LAS ARISTAS.....	177
ILUSTRACIÓN 67. RED DE CORO SECTORIZADA CON PESO 2 EN LAS ARISTAS.....	177
ILUSTRACIÓN 68. RED DE CORO SECTORIZADA CON PESO 3 EN LAS ARISTAS.....	178
ILUSTRACIÓN 69. RED DE CORO SECTORIZADA CON PESO 4 EN LAS ARISTAS.....	179
ILUSTRACIÓN 70. RED DE CORO SECTORIZADA CON PESO NULO EN LAS ARISTAS	179

(página en blanco)

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. RESULTADOS DE LA RED DE ILAYA	73
TABLA 2. DATOS DE LOS NODOS RED DE LA RED DE FOSSOLO	100
TABLA 3. DATOS DE LOS TRAMOS DE LA RED DE FOSSOLO	101
TABLA 4. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 1, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 80% Y 100%..	103
TABLA 5. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 1, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 110% Y 130%	104
TABLA 6. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 2, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 80% Y 100%..	111
TABLA 7. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 2, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 110% Y 130%	112
TABLA 8. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 3, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 80% Y 100%..	119
TABLA 9. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 3, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 110% Y 130%	120
TABLA 10. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 4, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 80% Y 100%	127
TABLA 11. NÚMERO DE SECTORES Y MODULARIDAD PARA PESO 4, CON CAPACIDADES DE TRABAJO ENTRE 110% Y 130%	128
TABLA 12. COSTOS DE TUBERÍAS Y VALVULERÍA	137
TABLA 13. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE FOSSOLO CON PESO 1	139
TABLA 14. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE FOSSOLO CON PESO 2	140
TABLA 15. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE FOSSOLO CON PESO 3	141
TABLA 16. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE FOSSOLO CON PESO 4	142
TABLA 17. TABLA RESUMEN DE MEJORES SOLUCIONES PARA RED DE FOSSOLO	143
TABLA 18. DATOS DE LOS NODOS DE LA RED DE BALERMA	145
TABLA 19. DATOS DE LOS TRAMOS DE LA RED DE BALERMA	149
TABLA 20. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE BALERMA CON PESO 1	153
TABLA 21. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE BALERMA CON PESO 2	156
TABLA 22. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE BALERMA CON PESO 3	157
TABLA 23. COSTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE BALERMA CON PESO 4	158
TABLA 24. TABLA RESUMEN DE MEJORES SOLUCIONES PARA RED DE BALERMA	159
TABLA 25. CURVA DE CONSUMOS	171
TABLA 26. TARADA DE VÁLVULAS PARA RED DE BALERMA	172
TABLA 27. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN EN LA RED DE CORO	180
TABLA 28. TARADO DE VÁLVULAS 1 A 12 PARA LA RED DE CORO	181
TABLA 29. TARADO DE VÁLVULAS 13 - 24 PARA LA RED DE CORO	182
TABLA 30. TARADO DE VÁLVULAS 1 - 12 PARA LA RED DE CORO POR ACO	183
TABLA 31. TARADO DE VÁLVULAS 13 - 24 PARA LA RED DE CORO POR ACO	184

(página en blanco)

LISTA DE ABREVIATURAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i> (Optimización por colonia de hormigas)
BABE	<i>Burst and background estimate</i> (Metodología de estimación por roturas y fugas de fondo)
BFS	<i>Breadht First Search</i> (Búsqueda en anchura)
DDA	<i>Demand Driven Analysis</i> (Análisis dependiente de la demanda)
DFS	<i>Depht First Search</i> (Búsqueda en profundidad)
DH	Distrito Hidrométrico
FAVAD	<i>Fixed and variable area discharged</i> (Área de descarga fija y variable)
IWA	<i>International Water Association</i> (Asociación Internacional del Agua)
MLRB	<i>Multi-Level Recursive Bisection</i> (Bisección recursiva multinivel)
MRI	<i>Modified Resilience Index</i> (Índice de resiliencia modificada)
PDD	<i>Pressure Driven Demand</i> (Análisis dependiente de la presión)
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Optimización por enjambre de partículas)
SAAP	Sistema de abastecimiento de agua potable

(página en blanco)

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Preámbulo

Los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAPs) son elementos primordiales en el funcionamiento de las ciudades, imprescindibles para garantizar la calidad de vida de sus habitantes. Están constituidos por un conjunto de tuberías y dispositivos funcionando bajo presión, cuya función principal es proveer agua en suficiente cantidad y calidad a los usuarios (Park *et al.*, 1998). A su vez, los SAAPs son una de las infraestructuras públicas más importantes y costosas, por lo que se procura que este activo valioso de las ciudades funcione con la máxima eficiencia posible, durante toda su vida útil (Haider *et al.*, 2014).

La mayoría de los centros poblacionales a nivel mundial disponen de SAAPs, variando principalmente su topología, dependiendo esta principalmente de la dispersión de los usuarios, de la topografía del área servida, de la localización de las fuentes de captación y de las zonas de almacenamiento (Alonso, 2008). Además, los SAAPs están conformados por una serie de dispositivos, tales como tanques, válvulas, bombas, tuberías, entre otros, cuyo buen funcionamiento es indispensable para el correcto comportamiento de todo el sistema. Dentro del conjunto de elementos, las tuberías constituyen el componente predominante, teniendo a su vez, los mayores costos tanto en términos de capital inicial como en mantenimiento y renovación (Bakri, 2014; Gheisi *et al.*, 2016).

Pese a lo expuesto en el párrafo anterior, en el día a día del funcionamiento de los SAAPs, el mantenimiento, actualización y renovación va dejándose de lado, ocasionando problemas tales como roturas, aumento del índice de fugas, entre otros, los que se traduce en pérdidas (tanto físicas como aparentes) y afectación de los niveles de servicio. Se estima que en los países en vías de desarrollo del 50 al 60% del agua se pierde en fugas y a nivel global, se estima que es el 35% (Farley *et al.*, 2008). No se puede obviar el malestar que generan los mencionados problemas entre los usuarios, quienes generan presión a los entes encargados a fin de buscar soluciones inmediatas. Particularmente crítica es la situación que se plantea en países en vías de desarrollo, en donde las autoridades correspondientes cuentan con un presupuesto reducido que no permite mitigar todos los aspectos negativos anteriormente planteados.

A pesar de que en el mundo están en funcionamiento gran cantidad de SAAPs, existe una gran incógnita con respecto a su estado de deterioro, por lo que ingentes cantidades de recursos económicos son necesarios para su mantenimiento, modernización y revitalización (Park *et al.*, 1998). Sin embargo, la escasez de los fondos públicos para la construcción y mantenimiento, además del avance en la edad de los SAAPs, son la causa de que la confiabilidad en ellos sea un problema importante para los diseñadores y operadores (Wagner *et al.*, 1988).

El incremento en la obsolescencia de los SAAPs suscita serias preguntas acerca de las acciones apropiadas para reparar, reemplazar y rehabilitar los sistemas deteriorados y anticuados (Karaa y Marks, 1990). De aquí, que las empresas operadoras se enfrenten a dos problemas principales relacionados con los SAAPs, a saber, cómo optimizar la red de distribución existente para lograr rentabilidad y, al mismo tiempo, cómo satisfacer la creciente demanda de agua (Bakri, 2014).

La sectorización de los SAAPs, ha surgido como una alternativa que trata de controlar los problemas anteriormente mencionados. Surgida en el Reino Unido a inicios de los años ochenta, con la publicación del reporte 26 de la UK Water Authorities Association (Morrison, 2004a), el concepto de sectorización parte del principio de “divide y vencerás”. En ella, la red es seccionada en varios subsectores con entradas independientes, lo que facilita la operación y el monitoreo de los caudales entrantes a los sectores, coadyuvando a la detección de fugas y a su pronta reparación, permitiendo además uniformizar presiones (Di Nardo *et al.*, 2011; Sturm y Thornton, 2005).

Sin embargo, las investigaciones realizadas en torno a la temática han estado dirigidas a la sectorización de redes sin tomar en cuenta el estado de funcionamiento inicial de estas, es decir, sin considerar si la red está en capacidad para suplir las demandas requeridas. Adicionalmente, ha sido muy poco estudiado el beneficio económico que se pueda percibir por la sectorización de la red, partiendo desde unos costos conocidos de funcionamiento, lo cual resultaría muy interesante para las empresas operadoras de los servicios.

En la presente tesis, se propone estudiar cómo la variación de la capacidad hidráulica de la red modifica los distintos subsectores que se puedan formar en procesos de sectorización de redes existentes. Asimismo, partiendo de un análisis económico, se pretende estudiar la

viabilidad de sectorizar redes en función de esas limitaciones impuestas versus la realización de medidas de control de presiones o la reparación de fugas.

1.2. Justificación

Como principio fundamental, los SAAPs se deben diseñar para garantizar el suministro de agua bajo principios de cantidad, calidad y continuidad a todos y cada uno de los usuarios de la red; sin embargo, en la actualidad, rara vez los ingenieros se enfrentan al problema de diseñar una red de distribución de una ciudad totalmente nueva.

Por lo anteriormente expresado, es muy común encontrarse con el problema de mejorar las condiciones hidráulicas de funcionamiento de redes en servicio, esto debido a que, al pasar el tiempo y con el crecimiento anárquico de las ciudades, las redes se amplían de forma similar, conllevando esto a que las redes no trabajen con la eficiencia deseada.

En la optimización del funcionamiento de redes existentes, debe ante todo analizarse el funcionamiento actual y los costos asociados a ese funcionamiento. De esta manera, las alternativas de solución pueden contrastarse con la información inicial y, de esta forma, verificar la viabilidad de la aplicación de cada una de las soluciones propuestas.

En el manual de la International Water Association, IWA por sus siglas en inglés (Alegre et al., 2006), que es una de las literaturas existentes más notable, únicamente se dan líneas generales para los procesos de sectorización, en cuanto a tamaño y número de abonados, entre otros parámetros actuales; pero no se evalúan los estados iniciales de las redes, con la finalidad de indagar qué otras soluciones se pudiesen seleccionar, o si, por el contrario, el proceso de sectorización no es viable, ya que el retorno de beneficio económico y de reducción de fugas no es comparable con la inversión a realizar.

1.3. Objetivos

Objetivo Principal:

Evaluar el efecto de incluir restricciones de capacidad hidráulica en la sectorización de redes.

Objetivos Específicos:

1. Analizar distintas metodologías para la evaluación de la capacidad hidráulica en redes de distribución.
2. Seleccionar los algoritmos de sectorización, pudiendo ser estos basados en técnicas básicas de partición de grafos, teoría de redes sociales, análisis de clúster, técnicas multi-agente, y otros.
3. Desarrollar modelos matemáticos de sectorización de redes y de optimización de entradas basadas en técnicas estocásticas (algoritmo genético, u otro).
4. Evaluar y verificar el comportamiento del modelo desarrollado en dos redes clásicas de la literatura científica, desde el punto de vista de la topología de los sectores y desde el punto de vista de aprovechamiento económico.
5. Validar la metodología propuesta en una red real, ubicada en Coro, en el Estado Falcón, de Venezuela.

1.4. Metodología

Partiendo de la definición de que la capacidad de la red es la demanda máxima que esta puede suplir garantizando la presión mínima necesaria en el punto más desfavorable de esta (Ilaya-Ayza *et al.*, 2016b), se trabajará con este indicador en dos redes de prueba para evaluar su influencia en los subsectores obtenidos en los procesos de sectorización.

Las redes de prueba empleadas serán la de Balerma, la cual es una adaptación de una red de irrigación ubicada en la provincia de Almería, España (Reca y Martínez, 2006); y la de Fossolo, la cual es la simplificación de un sector de Bologna, Italia (Bragalli *et al.*, 2008). Ambas redes son las escogidas, en primer lugar, por ser bien estudiadas en el ámbito del diseño de redes y, en segundo lugar, por poseer tamaños medio y pequeño, respectivamente.

En los procesos de sectorización pueden emplearse algoritmos de clústering debido a la analogía existente entre los agrupamientos de los diferentes elementos de los SAAPs con los principios aplicados en las técnicas de agrupamiento de datos. Debido a la gran diversidad de técnicas existentes y a las diferencias en cuanto a la manera en cómo realizan los agrupamientos, se decidió probar diversas técnicas basadas en la detección de comunidades

en redes, ya que poseen la ventaja de agrupar en función de la información en las conexiones, y no solo en la información almacenada en los nodos, lo cual resulta favorable para el tema en estudio en este trabajo, debido a que pudiera tomarse en cuenta cómo la variación de los niveles de exigencia en las tuberías ocasionada por la variación en la demanda, afectaría la formación de sectores.

Como parámetros para ponderar las conexiones se probaron cuatro opciones: caudal circulante con la red trabajando a la capacidad deseada; energía disipada en cada tramo con la red trabajando a la capacidad deseada; relación entre el caudal circulante en el tramo y el caudal circulante a capacidad máxima teórica de la red; relación entre la energía disipada trabajando a la capacidad deseada y la disipación de la energía en los tramos con la red trabajando a capacidad máxima.

Todos los pesos establecidos para las conexiones en la red fueron probados en distintos algoritmos de detección de comunidades, gracias a su implementación en el paquete Igraph en R (Csardi y Nepusz, 2006). Los algoritmos probados fueron Infomap (Rosvall *et al.*, 2009), Walktrap (Pons y Latapy, 2005), Fast greedy (Clauset *et al.*, 2004), Edge betweenness (Newman y Girvan, 2004), Luovain (Blondel *et al.*, 2008) y Leiden (Traag *et al.*, 2019).

Obtenida la partición por cualquiera de los métodos anteriormente expuestos, es exportada esta solución para ser trabajada en el entorno MATLAB y así optimizar las entradas y salidas de los sectores por medio de la implementación de un algoritmo de enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*) el cual está basado en el trabajo originalmente presentado por Kennedy (1995) y posteriormente estudiado por Montalvo (2010). Adicionalmente, para dar mayor robustez a los resultados, se hace una comparación con un algoritmo de colonia de hormigas ACO (Dorigo *et al.*, 1996), por sus siglas en inglés (*Ant Colony Optimization*), e implementado para dominios continuos por Socha y Dorigo (2008).

Como función objetivo de este proceso se tiene la minimización de los costos de implementación de las válvulas de cierre, macro medidores y refuerzo en los tramos donde sea necesario incrementar los diámetros. Básicamente, en primer lugar, se verifica si la opción de solución cumple con la presión mínima requerida (ya que al sectorizar tenemos una muy probable pérdida de capacidad de servicio de la red); si no cumple, iterativamente,

ajustamos los diámetros hasta lograr el cumplimiento. Verificado esto, estimamos el costo de las válvulas de cierre, de los macro medidores y de refuerzo de diámetros.

Posterior a ello, se fijan válvulas rompe cargas en las entradas de los sectores, con la finalidad de realizar un control de la presión en la red e intentar disminuir al máximo las pérdidas por fugas. En este caso se plantea un problema de optimización combinatoria, en el cual se deberá obtener la consigna de dichas válvulas para cada hora del día, tratando en todo momento de garantizar las presiones mínimas establecidas de servicio minimizando el volumen de fugas.

1.5. Estructura del documento

El presente trabajo está dividido en ocho capítulos. El capítulo 1 está compuesto por la introducción del tema presentado en este trabajo, así como la presentación de los objetivos y su metodología. En el capítulo 2 se presenta una breve revisión del estado del arte referente a la temática de la sectorización de redes que sirve como punto de partida para la presente investigación. En el capítulo 3 se analizan distintas metodologías para la estimación indirecta de la capacidad de las redes y la relación entre ellas; así mismo se presenta el caudal máximo teórico y se establece su metodología de cálculo. En el capítulo 4 se hace una breve revisión de los métodos de detección de comunidades y se seleccionan los métodos a usar en el presente trabajo. El capítulo 5 trata sobre la aplicación de los métodos a las redes de prueba, tomando para ello distintos pesos en las aristas de las redes; así mismo se hace una primera aproximación para la determinación de los costos de implementación del esquema de sectorización. En el capítulo 6 se incorporan las pérdidas existentes en la red al modelo matemático y se determina, mediante el control de presiones, cuál sería la configuración óptima de las válvulas de ingreso a cada sector. En el capítulo 7 se aplica la metodología desarrollada a una red real de gran tamaño. Finalmente, el capítulo 8 presenta las conclusiones de esta tesis doctoral y esboza líneas futuras de investigación.

2. LA SECTORIZACIÓN DE REDES

2. LA SECTORIZACIÓN DE REDES

Los sistemas de abastecimiento de agua enfrentan hoy en día grandes retos. El cambio climático, junto con el crecimiento poblacional, son dos de los problemas principales, enfrentando un recurso cada vez más escaso contra una demanda cada vez más creciente en el tiempo. Asimismo, podemos sumar que las redes no son producto de un diseño único, sino resultado de un crecimiento anárquico para enfrentar el crecimiento poblacional, trayendo como consecuencia, una estructura topológica muy poco clara, lo que ocasiona dificultades en su control y administración (Izquierdo *et al.*, 2009).

Aparte de lo anteriormente expresado, no todo el volumen de agua suministrado a la red es aprovechado por los abonados. Estas pérdidas o fugas en las redes de suministro de agua constituyen una cantidad significativa, a veces más del 70% del volumen total suministrado (Dias *et al.*, 2006; Samir *et al.*, 2017). Se puede apreciar entonces que hay que tomar acciones para poder mejorar la situación y enrumbar los sistemas a ser cada vez más eficientes.

2.1 Orígenes y principios de la sectorización

La sectorización de SAAPs es una técnica empleada para la optimización del funcionamiento de estos sistemas, además de ser usada en el control y localización global de fugas. Las primeras propuestas fueron realizadas en el Reino Unido y ya han sido replicadas en muchos países (Di Nardo *et al.*, 2013). El primer reporte publicado surgió a inicios de los años ochenta, según consta en el reporte 26 de la UK Water Authorities Association (Morrison, 2004a). Parte del principio de “divide y vencerás”; en él, la red es seccionada en varios subsectores con entradas independientes, lo que facilita la operación y monitoreo de los caudales entrantes en los sectores, coadyuvando a la detección de fugas y a su pronta reparación, además de permitir uniformizar las presiones de servicio (Sturm y Thornton, 2005).

Como fue anteriormente expuesto, el principio fundamental consiste en la división de la red en varias subredes más pequeñas denominadas sectores o distritos hidrométricos (DHs, o

DMAs por su expresión en inglés, *district metered areas*) lográndose una reducción de hasta 85% de la fugas reportadas en las redes donde se aplicó (Diao *et al.*, 2013; Perelman *et al.*, 2015). En la figura 1 se muestra un esquema de red de distribución sectorizada, donde puede apreciarse cómo la red queda dividida en diferentes zonas o sectores, cada una de ellas controlada por un caudalímetro o macro medidor en la entrada.

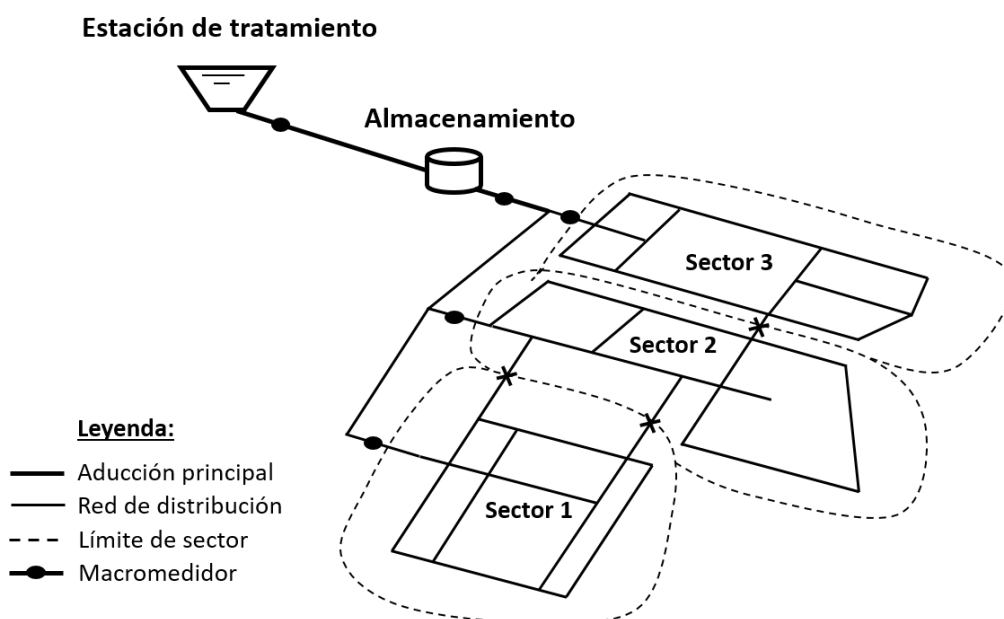


Ilustración 1. Esquema de sectorización

El empleo de la sectorización permite realizar un balance hídrico de cada uno de los sectores, localizar cuál de ellos presenta mayor volumen fugado y detectar necesidades adicionales en el sector. Asimismo, hace la red más manejable en cuanto a su tamaño ya que, al cuantificar el flujo en la entrada se hace más fácil identificar roturas, fugas y anomalías, en general, que se presenten, y subsanarlas en un menor tiempo. Esta ubicación rápida de una anomalía en el tiempo y su posterior solución coadyuvan en un ahorro importante del recurso agua y de costos operativos a las empresas de gestión de agua. Es por esto que los DHs han sido usados como herramienta para disminuir las fugas en los SAAPs, en redes que no han recibido atención a las fugas, más allá de los reportes típicos realizados por la población (Morrison, 2004b; Sturm y Thornton, 2005).

Así pues, el objetivo principal de crear DHs es obtener la información distribuida y manejable a escala necesaria para realizar acciones clave en cada sector (Tzatchkov *et al.*, 2014). Entre estas acciones se pueden mencionar las siguientes:

- 1.- Auditar la eficiencia hidráulica de la red.
- 2.- Caracterizar la curva de demanda.
- 3.- Detectar fugas rápidamente mediante el análisis de la evolución del flujo mínimo nocturno.
- 4.- Verificar los resultados de las campañas de búsqueda y corrección de fugas.
- 5.- Reducir los costos de mantenimiento.
- 6.- Planificar la inversión de recursos.

Aún más, la sectorización en redes no debe definirse solo en términos de configuración de la red, sino que debe establecerse como un método de gestión permanente, ya que permite la gestión mediante la acción directa sobre la presión del sistema; además, el conocimiento profundo de los sectores permitirá la toma de decisiones tanto para el mantenimiento como para la operación de las redes.

La ejecución y puesta en marcha de una sectorización se podría resumir de una manera muy general en dos pasos:

- 1.- Aislar aquellas tuberías que conectan sectores adyacentes, mediante el correspondiente cierre de válvulas de seccionamiento instaladas en las tuberías a aislar.
- 2.- Instalación de medidores en todos los puntos de entrada o salida.

Una vez establecidos los límites de los sectores y la entrada a cada uno de los mismos (es aconsejable que ésta se produzca por la menor cantidad posible) (Farley, 2001), se puede proceder entonces al análisis del funcionamiento del sector, con la finalidad de detectar las fugas que se están produciendo en él, de acuerdo con los siguientes pasos:

- 1.- Realizar un control nocturno de los volúmenes inyectados y consumidos, ya que en ese periodo los consumos serán menores y la red alcanzará el máximo de presión.
- 2.- Identificación de los sectores con mayor cantidad de fugas, producto de una mayor diferencia entre los caudales inyectados en los mismos, los consumos registrados y las fugas de fondo.

Se puede entonces resumir que la sectorización permite, detectar fugas rápidamente mediante el análisis de la evolución del flujo nocturno, permite detectar fraudes y errores en medición, así como reducir los costos de mantenimiento, traduciéndose esto en una forma de auditoria de la eficiencia de la empresa prestadora del servicio.

2.2 Criterios para la definición de los sectores

Acometer un estudio de sectorización que resulte eficiente en la gestión y explotación posterior del sistema de abastecimiento requiere de un modelo matemático que permita analizar y evaluar diversas hipótesis de funcionamiento de la red en servicio, sin afectar a la actividad diaria de la misma.

La práctica ha conllevado a generar diferentes criterios a la hora de formar los sectores y, dependiendo de las características de cada red, pudiesen o no ser aplicables algunos. También, la experiencia del proyectista influye en la selección de los criterios para la formación de los sectores. Los principales criterios, y a su vez más habituales, que usualmente se siguen en cada sistema de distribución para la definición de los sectores son los siguientes (Morrison *et al.*, 2007):

- 1.- Debe haber equilibrio entre el coste económico que representan las pérdidas por fugas y el coste de inversión necesario para su reparación, partiendo del hecho de que existe un umbral mínimo de fugas (fugas de fondo) que no puede ser evitado.
- 2.- El tamaño de los sectores dependerá de las características de la red, así como también del nivel de precisión que se quiera lograr en la identificación de las fugas.
- 3.- Los elementos constituyentes de los sectores deberán poseer características similares, es decir, de ser homogéneos a nivel de estructuras (residenciales, industriales, comerciales, etc.). En caso de no ser posible, es necesario identificar las edificaciones con mayor requerimiento o necesidad.

- 4.- Tratar de que la diferencia en cotas dentro del sector no sobrepase los 30 metros, esto con la finalidad de que las presiones posean un alto grado de similitud.
- 5.- Se debe evitar que la sectorización implique la aparición de zonas muertas (zonas de estanqueidad de agua). En caso necesario, se debe considerar la colocación de desagües.
- 6.- El valor de presión en el sector se debe mantener en el rango establecido en las normativas locales. Si existen problemas de exceso de presión, se puede considerar realizar una gestión de la presión dentro de los sectores mediante el uso de válvulas reductoras. También puede ser necesario el aumento del diámetro de algunas líneas para reducir la pérdida de carga en el sector.
- 7.- Se debe minimizar el número de válvulas de cierre o frontera con otros sectores.
- 8.- Al ser implícita, dentro de la formación de sectores, la pérdida de resiliencia, en la medida de lo posible, se debe tratar de mantener los rangos de presión en los valores adecuados para poder garantizar la fiabilidad de la red.
- 9.- En la medida de lo posible, también, se tratará de que cada uno de los sectores cuente con un sólo caudalímetro, ya que esto reduce los costes asociados al mantenimiento, además de reducir la complejidad para hacer el balance de caudales del sector.

Hay que tener en cuenta que los criterios anteriormente expuestos son solo recomendaciones orientativas, y que, tras los primeros esquemas propuestos de sectorización, interese modificarlos para adaptarlos a la particularidad de la red, siempre tratando de garantizar el servicio a los usuarios finales. Como se aprecia, la selección y definición de los sectores es un procedimiento que no tiene solución única; existen diversos criterios para realizarla y estos varían, a su vez, en función de muchas variables (tipo de red, tipo y número de abonados, etc.).

En Reino Unido los tamaños de los distritos hidrométricos varían entre quinientos y tres mil abonados, mientras que se ha comprobado que en DHs formados por más de 5000 abonados resulta difícil discriminar las pequeñas fugas de los caudales nocturnos (Metola, 2009). Aparte de esto, a mayor tamaño del DH será mayor el costo de implementación, ya que será mayor el tamaño de los caudalímetros, válvulas, etc. Además, en DHs más pequeños, las fugas

pueden detectarse más rápidamente, se podrán identificar fugas de fondo de menor caudal, el tiempo de localización es menor y el costo asociado a la localización es menor.

De igual manera, cuanto menor es el tamaño de los DHs, más sencillo resulta ejecutar inspecciones. La *International Water Association* (IWA) recomienda definir el tamaño de los DHs en función del número de abonados (conexiones) dentro de ellos, estableciendo un rango que va de 500 a 3000 conexiones como el rango aceptable (Morrison *et al.*, 2007). Sin embargo, análisis económicos han demostrado que, en la mayor parte de los casos, el tamaño de los sectores debe estar entre 3000 y 5000 conexiones (Thornton *et al.*, 2008).

Como se ha dicho anteriormente, estos criterios tan solo son un punto de partida para la definición de los sectores. Tras el análisis de cada sectorización, quizá interese modificar alguno de ellos para así poder dar un mejor servicio al usuario, ya que no todos los criterios de sectorización siguen motivos netamente hidráulicos; algunos pueden enfocarse en criterios socioeconómicos o, inclusive, se pueden enfocar sobre alguna evaluación económica, por ejemplo, mantener un balance en el costo de las obras de sectorización y detección de fugas contra el ahorro de agua esperado.

2.3 Ventajas e Inconvenientes de la Sectorización

Las principales ventajas son:

- 1.- La sectorización mejora el control y seguimiento del estado de la red al poder efectuar auditorías aisladas en cada sector. Por un lado, se facilita la detección de sectores con bajo rendimiento y por otro lado la localización en tiempo real de cualquier fuga, rotura o deficiencia en la red.
- 2.- En caso de producirse algún tipo de falla, una red sectorizada puede reducir los efectos negativos confinando la falla a la extensión del sector afectado.
- 3.- Permite evaluar más fácilmente los resultados de las campañas de detección y corrección de fugas.
- 4.- Facilita la ejecución de las actividades de mantenimiento y reparación, logrando perjudicar a la menor cantidad de usuarios durante estos eventos.

Entre los inconvenientes se tiene:

- 1.- Al generar sectores se cierran algunos tramos de tuberías, generando una ramificación de la red, trayendo esto una disminución de garantía de suministro respecto a la red mallada inicialmente.
- 2.- Al recomendarse que cada sector tenga una o dos tuberías de alimentación, un fallo en estas tuberías de suministro dejaría sin agua a todos los abonados del sector.
- 3.- Aumento del tiempo de permanencia del agua en la red, lo que ocasiona una probable disminución del cloro residual y fallo en la garantía de suministro de agua con los estándares de calidad requeridos.
- 4.- La sectorización conlleva una fuerte inversión inicial ya que, aparte de instalar válvulas y contadores en los puntos de alimentación, puede requerirse reforzar ciertos tramos de tubería para garantizar la presión de suministro.

En todos los aspectos mencionados anteriormente, se puede aseverar que un esquema de sectorización óptimo tiene que representar un compromiso entre los aspectos positivos y negativos (Campbell, 2017).

2.4 Etapas en el proceso de Sectorización

Las etapas a seguir para sectorizar una red son comúnmente (Campbell, 2013):

- 1.- Implementar un modelo computacional que represente la situación actual de la red. Esto, con la finalidad de realizar un diagnóstico inicial del funcionamiento.
- 2.- Plasmar en el modelo computacional la propuesta de sectorización, conformada básicamente por la ubicación de los caudalímetros y de las válvulas de cierre o frontera. A manera de recomendación, cada DH tratará de estar conformado por el menor número de entradas y salidas posibles, preferentemente una entrada única y, como mucho, una salida.
- 4.- Modelar la propuesta y evaluar el cumplimiento de las demandas y las presiones en el interior de cada sector, de manera que estas sean suficiente para dar un buen servicio a los usuarios y que, a su vez, no llegue a ser tan alta que propicie daños a la red y, en consecuencia, favorezca la generación de fugas. En caso de existir exceso de

presión en ciertos sectores se podrán añadir válvulas reductoras de presión en aquellas zonas donde sea requerido.

5.- En el caso de no cumplir la propuesta inicial, se realizarán modificaciones en la localización de los caudalímetros y válvulas frontera, y se volverá a modelar tratando de lograr el objetivo planteado.

6.- De la propuesta seleccionada y puesta en marcha en el terreno, se deberán hacer pruebas in situ para comprobar el aislamiento real del sector y efectuar mediciones de presión en nudos ubicados estratégicamente en del mismo.

2.5 Estado del arte en la sectorización

Hasta la fecha, en muchos casos, la manera típica de elaborar las propuestas de sectorización de redes existentes y nuevas, está basada en la experiencia del ingeniero a cargo. Es decir, en base a su experticia, el ingeniero prueba algunas propuestas de sectorización en un modelo matemático de simulación; obviamente que esto deja muchas posibles alternativas de solución (probablemente más económicas) fuera del espacio de búsqueda; si a esto sumamos que, comúnmente, estas redes son de gran tamaño, podremos apreciar que el espacio de soluciones se haría aún más grande, por lo que la sola experiencia del profesional no sería suficiente para lograr la mejor solución.

Para hacer frente a esa limitación, las aproximaciones realizadas en los estudios de sectorización en los trabajos académicos publicados explotan la similitud que existe entre las redes y los grafos. En ellas, se asume un grafo como la abstracción de la red, donde los nodos de consumo y las fuentes serán los vértices del grafo; y las tuberías, bombas y válvulas, las aristas. Asimismo, los esfuerzos en el área para hallar clústeres o agrupamientos (formas análogas de llamar a los sectores) en las redes han estado divididos en dos líneas principales; la primera ha sido desarrollada en el área llamada partición de grafos, la cual originariamente ha sido usada en el campo de la computación, y está relacionada con la computación paralela y con el diseño de circuitos integrados. La segunda está identificada con nombres como modelación de bloques, clúster jerárquico o detección de comunidades; esta área ha sido desarrollada principalmente por sociólogos y trabajada más recientemente por físicos, biólogos y matemáticos, con aplicaciones importantes en redes biológicas. Podemos apreciar

que son similares los objetivos que persiguen, pero, al estudiarlas mejor, se entiende que existen algunas diferencias significativas (M. Newman, 2006).

Dentro de los trabajos enfocados en la sectorización de redes de agua basados en las técnicas de partición de grafos, tenemos entre los trabajos más relevantes, a Tzatchkov *et al.* (2006), los cuales estudiaron como solución para la sectorización de redes el algoritmo *Depth First Search* (DFS) (Tarjan, 1972) y el algoritmo *Breadth First Search* (BFS) (Pohl, 1969) de partición de grafos y, a su vez, propusieron que la contribución de las fuentes a los distintos nodos de la red fuese a través del algoritmo de cálculo de la concentración de una sustancia química conservativa. En esa línea, más recientemente, el algoritmo es retomado por Lifshitz y Ostfeld (2018) para generar sectores dentro de una red y poder estudiar la dispersión de un contaminante.

En esta misma línea de algoritmos de sectorización trabajó Di Nardo *et al.* (2011); en este caso, propusieron como aproximación para definir la sectorización de redes de distribución de agua, técnicas basadas en la partición de grafos comúnmente aplicadas en la computación distribuida. La técnica aplicada por ellos se basaba en la analogía de la existencia de simulaciones numéricas a gran de escala, tales como las basadas en métodos de elementos finitos, y que estas, debido a su complejidad, requieren la distribución de los cálculos entre diversos computadores. Esta distribución deberá ser tal que se cumpla con los siguientes principios: 1.- el número de elementos que se asigne a cada procesador debe ser el mismo, 2.- el número de elementos adyacentes asignados a diferentes procesadores debe ser minimizado, con la finalidad de minimizar la comunicación entre los procesadores. Como se aprecia, la partición de grafos fue usada para satisfacer estas restricciones y, por su parecido a las redes de distribución de agua potable, se aplican a ellas. Los autores propusieron en su trabajo un algoritmo *Multi Level Recursive Bisection* (MLRB), el cual justifican como método altamente eficaz para el cálculo de una partición de k-forma de un grafo. Sin embargo, este método tiene entre sus desventajas que hay que establecer el número de sectores que se quieran crear. Reportaron que obtuvieron los mejores resultados usando pesos para los vértices y nodos, datos de propiedades hidráulicas como caudal, energía disipada o diámetros para las líneas; y demandas para los nodos. Es de hacer notar que, para poder seleccionar qué tuberías cerrar, se probaron varios índices de comportamiento, entre los cuales se usaron el índice de resiliencia y un índice hidráulico, en este caso medido por el diferencial de presión.

Por su parte, Izquierdo *et al.* (2009), partiendo del conocimiento del crecimiento anárquico de las redes y de éstas adolecer de una estructura topológica definida, realizaron una propuesta innovadora al intentar hacer una aproximación de generación de distritos hidrométricos aplicando una aproximación multi-agente, explotando las capacidades de este algoritmo en cuanto a manejar problemas combinatorios con aproximación sub-óptima en tiempo real. En esa misma línea de investigación de clúster jerárquico y sistemas multi-agente, Herrera (2011) presentó una propuesta basada en el uso de métodos *kernel*, donde demuestra que el clústering espectral y el aprendizaje semi-supervisado pueden ser métodos con buen comportamiento en el paradigma de encontrar una red sectorizada que requiera usar un número mínimo de válvulas de corte, pero tiene como desventaja que sus algoritmos pueden volverse algo lentos, concluyendo que aplicar sistemas multi-agente en combinación con clústering basado en métodos *kernel* resulta satisfactorio.

En esta misma línea de trabajo Diao *et al.*, (2013) indican que la intención para la aplicación de algoritmos en la creación de los DHs es la minimización de las tuberías entre los distintos DHs a cerrar y esto, en redes de distribución altamente densas, es un problema, ya que las redes se van expandiendo con la evolución de la ciudades y con el desarrollo de comunidad en comunidad, de ahí que se puedan aplicar algoritmos de detección de comunidades para plantear la sectorización de este SAAP. En este estudio se usó la modularidad para cuantificar la calidad de las soluciones obtenidas y, en función de ella, proponer la fusión de otras comunidades hasta un criterio de parada en función del mismo indicador de modularidad. Sin embargo, en la aplicación del algoritmo, el tiempo de aplicación fue extremadamente largo, por lo que su aplicación solo es recomendable para redes de pequeño tamaño, aparte de que la asignación de los pesos a los factores de decisión debe ser realizada con extremado cuidado, ya que tiene efectos significativos sobre el resultado.

Por otro lado, Di Nardo *et al.* (2014b) presentaron un trabajo que es continuación de su línea de estudio de sectorización basada en la teoría de grafos, pero esta vez tomando en cuenta índices energéticos acoplados con un algoritmo genético, como factor decisorio para la selección de las distintas alternativas de sectorización, y lo probaron en dos redes reales. En cuanto a los índices energéticos usados, los autores tomaron el índice de resiliencia de la red (Prasad and Park, 2004) y los índices de presión. Si bien los autores indican que puede ser usada esta técnica para redes grandes, tiene como inconveniente su limitación a dos fuentes

de suministro en la red; aparte de esto, debe plantearse en todo momento cuántos son los distritos hidrométricos que se quieran crear.

Ese mismo año, Di Nardo *et al.* (2014a) presentaron otra propuesta de solución al problema de sectorización, pero desde otro enfoque: esta vez plantean la generación de sectores hidrométricos a través de un algoritmo de bisección de grafos acoplado con un algoritmo de colonia de hormigas para definir los caminos más cortos hasta cada nodo del grafo y, a su vez, evaluaron las soluciones en base a criterios energéticos, esta vez partiendo desde el índice de resiliencia de Todini (2000). En este caso, se tuvo como limitación de este algoritmo que es recomendable su aplicación a redes pequeñas, aparte de que la determinación de los pesos en los nodos tiene una influencia importante en los resultados, por lo que su determinación es crucial, además de que en el proceso de bisección el número de sectores siempre debe ser par y de acuerdo al número preestablecido.

Asimismo, De Paola *et al.* (2014) reconocen que las propuestas de solución hasta la fecha planteadas en base a la teoría de grafos son ineficientes, porque están limitadas a consideraciones de conectividad en los nodos en los DHs y al acceso de cada nodo con la fuente; por eso es que recomiendan combinarse con otros algoritmos para poder compensar estas deficiencias. En su estudio plantean dos objetivos de optimización para mejorar el proceso: el primero de ellos es minimizar los costos y el segundo es minimizar la disminución del índice de resiliencia; para ello combinan la teoría de grafos con un algoritmo genético; sin embargo, no contemplan costos de ahorro energéticos, además de precisar establecer a priori el número de distritos hidrométricos.

En otra línea de desarrollo, Campbell *et al.* (2014) presentaron una propuesta de sectorización basada en un algoritmo de detección de comunidades, más específicamente, en la teoría de las redes sociales, donde inicialmente no se conoce el número de sectores en que se puede dividir la red. La metodología propuesta en este trabajo consistió en separar los alimentadores principales del resto de la red por medio del principio de reciprocidad de conexión y de un análisis de flujo y diámetro. Una vez identificados y separados los alimentadores principales de la red, se aplicó entonces el algoritmo *Walktrap* (Pons y Latapy, 2005) para, de esta forma, detectar comunidades con mayor modularidad. En esa misma línea, Campbell *et al.* (2016) presentaron posteriormente otro trabajo donde ahondan un poco más en lo planteado anteriormente y, por primera vez, incluyen el análisis económico,

con la finalidad de estimar los beneficios económicos de cada una de las opciones de sectorización, apoyándose en la aplicación de algoritmos genéticos y simulación Monte Carlo. En esa misma línea Brentan et al. (2017, 2018) extiende el anterior estudio e incorpora la evaluación del índice de resiliencia, la similaridad en la demanda de los sectores, la uniformidad en la presión, consumo eléctrico y el envejecimiento del agua como elementos a tomar en cuenta en la formación de los sectores hidrométricos .

En el año 2016, en el marco de la 18th WDSA 2016 (Water Distribution System Analysis Conference) Saldarriaga et al. (2019) proponen la Batalla de las sectorizaciones, en la cual pide generar una configuración de sectores para la red de E-Town ubicada en Colombia, siendo muy variadas las propuestas de solución planteadas, basadas en prácticamente toda la variedad de los enfoque revistos hasta ahora en esta revisión bibliográfica.

En esa misma línea de investigación, más recientemente, Chatzivasili et al. (2018) para sectorizar la red aplica en primer lugar una partición geométrica basada en una bisección recursiva de coordenadas y posteriormente incluye un modelo de mezcla gaussiana para determinar la configuración de las válvulas de cierre.

Sin embargo, a pesar de todas las investigaciones realizadas y de los beneficios probados que aporta la sectorización, no hay que perder de vista que también puede generar algunos inconvenientes, y en esta línea de investigación algunos autores han comenzado a presentar algunas propuestas. En este caso Wright et al. (2014; 2014b; 2015) hace una primera aproximación de la topología dinámica en las redes, en la cual plantea una configuración de sectorización con varios sectores en las horas de consumo mínimo (esto para lograr hacer un control efectivo de la presión sobre las fugas) y en las horas de mayor consumo operar con menos sectores pero mayor tamaño, con la finalidad de mejorar las condiciones operativas de la red. Todo lo anteriormente planteado mediante el empleo de válvulas motorizadas en sustitución de las tradicionales válvulas de corte. Mas recientemente, (Giudicianni et al., 2020), profundizan presentando una propuesta de sectorización dinámica en la cual basándose en la teoría de las redes complejas y de algoritmos semi supervisados de clústering, la red automáticamente se puede dividir en sectores autoadaptables, para responder a cada uno de los escenarios propuestos.

Como puede apreciarse del estado del arte en la sectorización, los intentos en cuanto a los métodos usados han ido progresivamente hacia las técnicas de detección de comunidades en

grafos, las cuales, como ventaja preponderante, toman en cuenta los enlaces o tramos que conectan los distintos nodos de la red, lo cual permite conservar la topología original durante el proceso de sectorización, favoreciendo esto la formación de sectores entre nodos que realmente estén conectados entre sí.

3. LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS REDES

3. LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS REDES

Para optimizar el funcionamiento de los SAAPs, es necesario conocer el estado aproximado de sus elementos constituyentes, además de la capacidad (o rango máximo de trabajo) que cada uno de ellos posee. La capacidad de algunos de los elementos de un sistema puede ser cuantificada a través de indicadores con relativa sencillez; por ejemplo: la capacidad de la fuente de suministro, el volumen de almacenamiento en los tanques, la capacidad de procesamiento de las plantas de tratamiento de agua potable, o la potencia, caudal y altura manométrica de las bombas (Ilaya-Ayza, 2016).

Asimismo, Formiga (2005) establece que la capacidad de respuesta de una red, es la aptitud de esta para cumplir con las demandas con una presión mínima y con un nivel aceptable de interrupción. Sin embargo, indica que la evaluación de la capacidad de respuesta puede ser hecha considerando diferentes medidas como: la relación del volumen de agua demandado y el suplido; la presión en los nodos, y el tiempo en que los nodos son plenamente atendidos, es decir, varios indicadores para medir sólo la capacidad.

3.1 Importancia de los indicadores de capacidad

Los indicadores son importantes porque permiten la administración y facilitan el proceso de toma de decisiones en los sistemas de abastecimiento urbano. Una vez un sistema o proceso ha sido medido, es importante entender cómo esta información puede ser usada para mejorar el proceso de toma de decisiones y de diseño (Bagheri *et al.*, 2006). Pero a pesar de la importancia de estos indicadores, técnicas sencillas para cuantificarlos y hallarlos son muy escasas.

El rendimiento como indicador del grado de funcionamiento de un sistema de distribución de agua puede ser medido por algunos factores interrelacionados, pudiendo ser estos: el costo total de mantenimiento y operación del sistema; la calidad del agua suplida; la capacidad de servicio del sistema en términos de cantidad y presión entregada; la integridad estructural y

seguridad del sistema operacional y la confiabilidad del agua suplida, es decir, la probabilidad de cumplir con los niveles de servicio requerido (Gheisi *et al.*, 2016; Karaa y Marks, 1990).

3.2 Indicadores para la estimación indirecta de la capacidad

A pesar de no ser los primeros en aparecer, uno de los grupos de indicadores más usados por las empresas hidráulicas para cuantificar el estado de los SAAPs, es el Sistema de Indicadores de Rendimiento para los servicios de agua del IWA (Alegre *et al.*, 2006) que, desde su primera aparición en el año 2000, ha sido ampliamente citado y utilizado en un gran número de proyectos. De hecho, gran parte de los indicadores recogidos en dicha publicación son resultado de las necesidades de las compañías de agua en todo el mundo que se expresaron durante las extensas pruebas de campo del sistema original. Sin embargo, en este manual no aparece de forma explícita un indicador de las capacidades hidráulicas en redes de distribución; de hecho, se plantea la capacidad de la red como un elemento cualitativo del sistema, el cual puede ser identificado mediante la reducción de presiones y las quejas de la población (Alegre *et al.*, 2006). Sin embargo, a pesar de que estos elementos caracterizan la falta de capacidad en la red; no permiten cuantificarla; y, al no contar con un valor que defina la capacidad de la red, se hace mucho más difícil tomar decisiones de forma eficiente y eficaz con relación a las acciones para mejorar esta situación (Ilaya-Ayza, 2016).

Unos de los primeros intentos por cuantificar el comportamiento de una red existente a través de indicadores fue en el trabajo presentado por Cullinane *et al.* 1992, donde establecen que la disponibilidad hidráulica de una red está directamente relacionada con la entrega de agua en los lugares adecuados, en el tiempo requerido y con la presión deseada. En este trabajo, se indica que se debe considerar la cantidad de agua entregada, la presión residual con la cual es entregada, el tiempo durante el cual se cumple esto, y, por supuesto, los sitios donde se cumple esto; por lo que la disponibilidad será el porcentaje del tiempo que la demanda puede ser suplida con la presión requerida. Asimismo, establecen que la disponibilidad en un nodo, queda definida como el porcentaje de tiempo que la presión en el nodo es mayor que la requerida, según se muestra en la ecuación:

$$A_j = \sum_{i=1}^M \frac{a_i * t_i}{T} , \quad (1)$$

donde, A_j es la capacidad del sistema para satisfacer la demanda en el nodo j ; t_i es el periodo de tiempo i ; T es el periodo de tiempo total simulado; M es el número de periodos de tiempo

considerados; y a_i es el factor de cumplimiento del nodo en el periodo i , y que obedece al siguiente planteamiento:

$$a_i = 0 \text{ si } P_{ij} < P_j^{min} , \quad (2)$$

$$a_i = 1 \text{ si } P_{ij} \geq P_j^{min} , \quad (3)$$

siendo P_{ij} la presión en el nodo j en el periodo i ; y P_j^{min} la presión mínima en el nodo j .

De esta forma, la capacidad de respuesta del sistema quedará expresada por:

$$\bar{A} = \sum_{j=1}^N \frac{A_j}{N} , \quad (4)$$

donde, N es el número total de nodos de la red.

Del planteamiento anterior, es que se admiten dos formas de evaluar la capacidad de respuesta de una red. En la primera de ellas, la capacidad de respuesta es medida en los nodos más desfavorables de la red. En la segunda, es medida para todo el sistema, es decir, se mide la capacidad para todos los nodos de la red (Gupta y Bhave, 1996).

La utilización de este criterio para evaluar la red tiene un inconveniente, y es que no expresa diferenciación si no se cumple con el 1% de la presión requerida o con el 99% de la presión requerida.

Otra forma de obtener la disponibilidad hidráulica de un sistema fue ofrecida por Gupta y Bhave (1994), quedando establecida como:

$$\bar{A} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^T \frac{Q_j^{Dem} * t_i}{Vol_{tot}^{req}} , \quad (5)$$

donde Q_j^{Dem} es el caudal demandado por el nodo j , Vol_{tot}^{req} es el volumen total esperado para el periodo que varía desde el tiempo 1 hasta T , y expresado por la siguiente ecuación:

$$Vol_{tot}^{req} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^T Q_j^{req} * t_i , \quad (6)$$

donde Q_j^{req} es el caudal requerido por el nodo j .

Sin embargo, esta formulación, según los mismos autores, presenta cierta limitación para reflejar la disponibilidad hidráulica del sistema, y, para demostrarlo, se presentan las siguientes situaciones que pudiesen ocurrir en la red:

1. Todos los nodos de la red son atendidos el 100% del tiempo y al 90% de la demanda prevista. Si bien esta situación no es la ideal, por no cumplir con el caudal requerido, es aceptable, debido a que se satisface casi toda la demanda durante todo el tiempo.
2. Se atiende el 100% de la demanda durante el 90% del tiempo, y el 10% restante el atendimento es nulo, por lo que pudiésemos estar hablando de una deficiencia grave del sistema, ya que el 10 % del tiempo la red no funcionaría.
3. Se atiende el 90% de los nodos y se satisface el 100% de su demanda durante todo el tiempo, mientras que en el 10% de los nodos restante no se atiende nunca ninguna demanda. Esta situación es muy grave y se habla de una falla permanente del sistema.

Podemos apreciar que en todas las circunstancias señaladas el indicador de disponibilidad hidráulica \bar{A} es igual a 90%; si bien es un valor alto, vemos entonces que no identifica correctamente lo que pasa en la red.

Por otro lado, Coelho (1997) definió que una red trabaja de forma adecuada, si en sus nodos la presión está limitada dentro de un rango mínimo y máximo requerido. Como resultado de su trabajo, presenta un indicador denominado presión de relación con el rendimiento hidráulico (HP). El comportamiento del indicador es alto si la presión en los nodos está cerca del límite inferior establecido, lo cual significa que hay menos desperdicio de energía mientras se atienden las demandas. El indicador en cuestión queda expresado por la siguiente ecuación:

$$HP = \sum_{j=1}^{N_n} \frac{d_j}{d_0} i_{p_j} , \quad (7)$$

donde i_{p_j} es el grado atribuido al j – ésimo nodo de acuerdo con su presión. Así, conociendo los requerimientos de presión mínima ($pmín$) y máxima ($pmáx$) en la red, el grado es establecido por una curva de penalización, donde 4 denota servicio óptimo (presión en el nodo es igual a la presión mínima); 3 indica servicio adecuado (presión en el nodo es igual a la presión máxima), 2 indica servicio aceptable (presión igual a 1,25 $pmáx$); 1 señala servicio inaceptable (presión $\geq 1,50 pmáx$); y 0 indica sin servicio (presión en nodo $\leq 0,75 pmín$); además d_j es la demanda en el nodo j , y d_0 es la demanda total del sistema. Si bien es cierto que este indicador tiene algún tiempo de creado, es muy poco usado debido a la

discrecionalidad con la se establecieron los grados para establecer la penalización por las presiones de servicio.

El Porcentaje de Energía Consumida usado por Saldarriaga *et al.* (2010) como un indicador de la eficiencia del sistema fue, a su vez, presentado primeramente por Colombo y Karney (2002), y se define como la relación entre la energía consumida y la energía total suplida al sistema, el cual es calculado según la siguiente ecuación:

$$P_{PC} = \frac{\gamma \sum_{i=1}^{n_n} (q_i + q_{l,i}) (h_i^* - z_{min,i})}{\gamma \sum_{j=1}^{n_r} Q_j (H_j^* - z_{min,i})} \% , \quad (8)$$

donde para un nodo genérico i , $z_{min,i}$ corresponde a la altura topográfica mínima del nodo expresada en metros, $(q_i + q_{l,i})$ representa la sumatoria del caudal consumido más el caudal fugado, h_i^* corresponde a la piezométrica en el nodo, H_j^* altura de cabecera para cada fuente j , γ es el peso específico del fluido y Q_i es el caudal aportado por cada una de las fuentes del sistema.

Como se puede apreciar en la ecuación 8, P_{PC} indica el porcentaje del total de energía que se usa para prestar servicio. Un valor mayor de este indicador nos informa que el sistema es más eficiente en términos de consumo de energía; sin embargo, no cuantifica cuál es la capacidad máxima del sistema a pleno funcionamiento.

Otros indicadores más sencillos son los que engloba Greco *et al.* (2012), bajo el concepto de robustez, la cual se define como la capacidad que tiene la red de mantener un adecuado nivel de funcionamiento en el sistema, a pesar de la presencia desfavorable de variaciones en las condiciones de operación. Esta robustez la relaciona con los siguientes indicadores:

Media de la presión en los nodos de la red

$$H_{med} = \frac{\sum_{j=1}^N H_j}{N} . \quad (9)$$

Desviación Estándar de la Presión

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (H_j - H_{med})^2}{N-1}} . \quad (10)$$

Promedio de déficit de presión

$$H_D = \frac{\sum_{j=1}^N H_{D,j} Q_{D,j}^*}{Q} , \quad (11)$$

donde:

$$\begin{cases} H_{D,j} = 0 & \forall j: H_j \geq H_j^* \\ H_{D,j} = H_j^* - H_j & \forall j: H_j < H_j^* \end{cases} \quad (12)$$

Promedio de exceso de presión

$$H_S = \frac{\sum_{j=1}^N H_{S,j} Q_{D,j}^*}{Q} \quad (13)$$

donde:

$$\begin{cases} H_{S,j} = H_j - H_j^* & \forall j: H_j > H_j^* \\ H_{S,j} = 0 & \forall j: H_j \leq H_j^* \end{cases} \quad (14)$$

donde, H_j es la altura piezométrica, H_j^* es la altura piezométrica mínima, N son los nodos de la red, $Q_{D,j}^*$ demandas de diseño.

Por último, en esta serie de indicadores, tenemos el Excedente mínimo de energía (I_S), el cual es definido como la menor diferencia de presión entre la requerida $h_{r,i}$ y la observada $h_{a,i}$ (Atkinson *et al.*, 2014; Prasad *et al.*, 2003), y queda expresado mediante la ecuación:

$$I_S = \min(h_{a,i} - h_{r,i}) \quad (15)$$

3.2.1 La entropía

Otro indicador importante desarrollado es la entropía (Awumah *et al.*, 1990). Este considera todos los posibles caminos de flujo de agua a través de la red, desde los nodos de entrega y suponiendo que la probabilidad de que el agua fluya a través de una tubería está directamente relacionada con el gasto de la trayectoria y el gasto total de la red. Sin embargo, la formulación final fue propuesta por Tanyimboh y Templeman (1993), siendo expresada de la siguiente forma:

$$S = -\sum_{i \in IN} \left(\frac{Q_i}{T}\right) \ln\left(\frac{Q_i}{T}\right) - \frac{1}{T} \sum_{i \in IN} T_i \left[\frac{q_i}{T_i} \ln \frac{q_i}{T_i} + \sum_{j \in N_i} \frac{q_{ij}}{T_i} \ln \frac{q_{ij}}{T_i} \right] \quad (16)$$

donde T corresponde al caudal total que entra en la red desde tanques y reservorios, T_i es el caudal total que alcanza al nodo i , N_i es el grupo de nodos aguas arriba del nodo i conectados a él, q_{ij} es el caudal en la tubería ij , q_i es la demanda en el nodo i , Q_i es el caudal suministrado

por las fuentes, e IN es el número de fuentes de suministro del sistema y n_n es el número de nodos de consumo.

A pesar de lo difundido de este indicador, hay que destacar que la entropía está más relacionada con la conectividad de las redes que con la confiabilidad hidráulica (Ostfeld, 2004). Asimismo, los índices basados en conceptos energéticos representan mejor la red que la entropía (Creaco *et al.*, 2014; Prasad *et al.*, 2003).

3.2.2 Índice de resiliencia

El índice de resiliencia (Todini, 2000), llamado algunas veces índice de Todini, es comúnmente definido como la capacidad que tiene la red para sobreponerse a las condiciones de falla o sobredemanda en la red, estando definido según la ecuación mostrada:

$$Ir = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{n_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{n_n} q_i^* h_i^*}, \quad (17)$$

donde Ir es el Índice de resiliencia, n_n es el número de nodos de consumo, n_r es el número de fuentes del sistema, $(h_i - h_i^*)$ es la diferencia de alturas piezométricas entre la real obtenida y la mínima necesaria para garantizar la presión de servicio, Q_k y H_k son, respectivamente, el caudal y la altura piezométrica aportada por las fuentes, y q_i^* y h_i^* son, respectivamente, el caudal mínimo y la altura piezométrica mínima para cumplir con los requerimientos.

La formulación propuesta por Todini se basaba en consideraciones físicas e hidráulicas que hace que no se requiera estadística inferencial para la distribución de probabilidades de los distintos tipos de fallas. En su propuesta, el índice de resiliencia está basado en un análisis de flujo de la red en estado estacionario donde se toma en cuenta la energía disipada por las tuberías, por lo que la resiliencia de una red es una medida del excedente de energía disponible en el abastecimiento. Si bien no hay una definición universalmente aceptada de resiliencia, una de las más comunes es aceptar que la resiliencia hidráulica se formula como una medida de la capacidad de la red de sobreponerse a condiciones de fallo en el abastecimiento.

Prasad y Park (2004), presentaron un índice de resiliencia de la red, que es una modificación del trabajo de Todini. En ella se tomó en cuenta la uniformidad de las tuberías que llegan a

los nodos, para, de esta forma, asegurar que exista redundancia entre los distintos bucles que forman la red, quedando el índice modificado de la siguiente forma:

$$NRI = \frac{\sum_{i=1}^n c_i q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^k Q_k H_k - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*}, \quad (18)$$

siendo

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n D_{ij}}{np * \max(D_{ij})}, \quad (19)$$

donde j es el número de tubos conectado a cada nodo, D_{ij} es el diámetro de cada tubería que confluye en el nodo i , y np es el número de tuberías confluyentes.

Por último, dentro de este índice, Jayaram y Srinivasan (2008) presentaron el índice modificado de resiliencia (MRI), en el cual se toma en cuenta la influencia de la existencia de diversas fuentes de abastecimiento en la red. Es importante destacar que tanto en el índice presentado por Todini como en el MRI, el valor oscila entre 0 y 1, mientras que en este último presentado puede ser mayor a 1. De esta forma la ecuación queda como:

$$MRI = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*} * 100. \quad (20)$$

Sin embargo, Baños *et al.* (2011) realizaron una comprobación de estos tres índices, demostrando que la diferencia de las dos modificaciones con respecto al original no era significativa. Asimismo, determinaron, como dato muy importante, que ninguno de esos tres índices considera el problema de la sobredemanda, además de no determinar la capacidad de proveer la demanda bajo estas incertezas.

Además, al comparar la resiliencia y la entropía, las dos medidas proveen diferente información acerca del comportamiento de las redes: el índice de resiliencia esta correlacionado con la presión, mientras que la entropía muestra sensibilidad ante cambios pequeños en la topología de redes simples (Greco *et al.*, 2012).

3.3 La Curva de consigna

Como se aprecia, el entramado de tuberías que representa la red de distribución, no tiene definida una forma para estimar su capacidad a través de un indicador (Ilaya-Ayza, 2016). De ahí que Ilaya-Ayza *et al.* (2016a) haya propuesto la curva de consigna para evaluar y

cuantificar la capacidad máxima que podría aportar una red garantizando la presión mínima de servicio en cada uno de sus nodos. Antes de proceder a definir este indicador, se hará una breve descripción de sus características y forma de obtención.

3.3.1 La curva de sistema

La curva de sistema o curva resistente, es aquella que representa gráficamente la altura de presión necesaria en cabecera (fuente de suministro o estación de bombeo) para entregar un determinado caudal en un punto de demanda, venciendo las pérdidas de energía a lo largo de todo el recorrido.

En la figura 2, se muestra un esquema simple visto de perfil de una aducción por bombeo. En él se aprecia que la altura necesaria para llevar el agua desde un depósito al otro está representada por la siguiente ecuación:

$$H_B = \Delta Z + J , \quad (21)$$

donde,

H_B es la altura a bombear

ΔZ es el desnivel físico entre depósitos

J esta referido a las pérdidas energéticas, expresadas en unidad de longitud, que se dan en la conducción y que es, a su vez, función de la ecuación general de pérdidas energéticas establecida, las cuales generalmente toman en cuenta elementos relacionados con el material de la tubería, longitud, diámetro, gravedad entre otros factores.

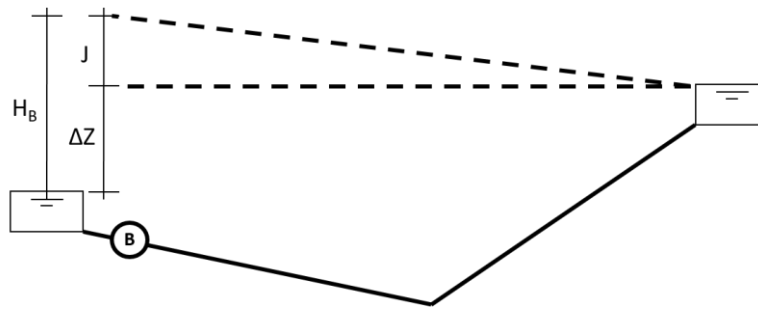


Ilustración 2. Esquema de visto de perfil de una aducción por bombeo

A manera de simplificación se puede decir que la curva resistente del esquema mostrado pudiese ser la mostrada en la figura 3.

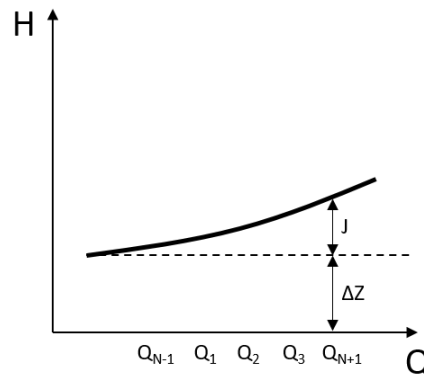


Ilustración 3. Curva de sistema mostrado en la figura 2

Para el instante de tiempo del sistema mostrado por la curva de sistema, se puede notar que, a medida que el caudal demandado aumenta, la energía necesaria para entregar dicho caudal aumenta también como consecuencia del incremento en las pérdidas energéticas. Ahora bien, en el caso planteado no hay restricción en la demanda, es decir la descarga es directa en el punto final de suministro. Pero en los sistemas de abastecimiento esto realmente no ocurre. Ya que, por un lado, los consumos son dependientes de la presión y, por el otro lado, todos los usuarios disponen de válvulas en el interior de las edificaciones por medio de las cuales administran la cantidad de caudal que requieren, tal y como se muestra en la figura 4.

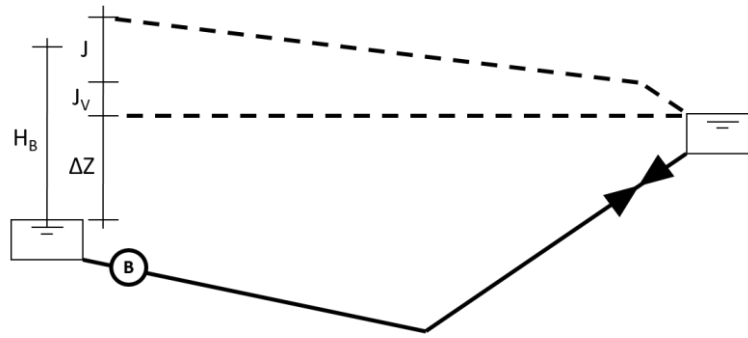


Ilustración 4. Esquema visto de perfil de una aducción por bombeo

La restricción mostrada incorpora un incremento adicional en las pérdidas energéticas, en este caso el término J_V , que expresa las pérdidas energéticas generadas por la válvula a la entrada del tanque, quedando la ecuación (21) reexpresada de la siguiente forma:

$$H_B = \Delta Z + J + J_V . \quad (22)$$

En este caso J_V es expresada mediante la ecuación de pérdidas en accesorios:

$$J_V = K(\theta)Q^2 , \quad (23)$$

donde,

$K(\theta)$ Coeficiente de pérdidas de la válvula debido al caudal, siendo este coeficiente función del grado de apertura y del diámetro de la propia válvula.

Q Caudal circulante en el sistema.

De esta manera, la nueva representación de la curva de sistema cambia. Su comparación con la curva anterior puede apreciarse en la figura 5. En ella se aprecia que la existencia de la válvula incorpora pérdidas adicionales al sistema, relacionadas con un grado de apertura de la válvula.

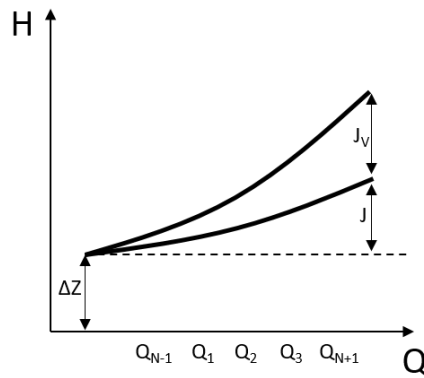


Ilustración 5. Curva resistente de sistema mostrado en la figura 3

Si se continúa disminuyendo el grado de apertura de la válvula se producirán nuevas curvas de sistema tal y como se muestra en la figura 6. En ella se aprecia que, a medida que se cierra la válvula en la descarga, el requerimiento de presión para poder entregar un determinado caudal es mayor, esto causado por el incremento del término resistente perteneciente a la válvula, el cual, a su vez, se hace cada vez mayor frente a las pérdidas ocasionadas por la propia tubería.

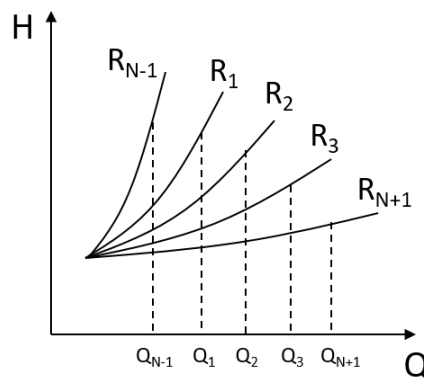


Ilustración 6. Curva resistente de sistema para distintos grados de apertura de válvula

Viendo este mismo caso desde otro punto de vista, se interpreta que a medida que se hace necesario más caudal en el punto de suministro es necesario abrir la válvula para poder disminuir la resistencia, disminuyendo así la pendiente de la curva. Si continuamos analizando la figura, se puede ver que la curva ubicada al extremo izquierdo será la curva que producirá una máxima resistencia, la cual está asociada con el menor requerimiento de caudal en el

punto final de consumo. Por otro lado, la curva ubicada más a la derecha, será la de menor resistencia (o pérdidas energéticas) asociada a su vez con el mayor requerimiento de caudal.

Si ahora se integra a la misma figura la curva motriz teórica de un equipo de bombeo, se pudiese obtener el caudal que efectivamente será entregado al tanque para cada condición de demanda al final de la aducción, tal y como se muestra en la figura 7.

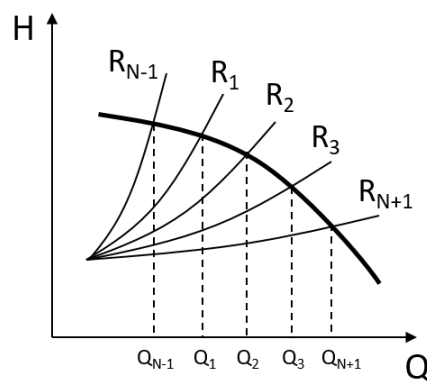


Ilustración 7. Curva resistente de Sistema y curva de bombeo

Si existe un modelo hidráulico que se aproxime lo más posible a lo existente, y sobre el que se puedan colocar los datos de consumos reales, se podrán elaborar las curvas resistentes de la red para las diferentes demandas, sean mínimas, medias y máximas, y serán estas las curvas del sistema que puedan usarse para optimizar el funcionamiento de los sistemas con bombeo.

Sin embargo, estas curvas son cambiantes en el tiempo, y el envejecimiento de las tuberías, ampliaciones a los acueductos, cambios en los patrones de consumo, entre otros factores, nos indican que debe hacerse una evaluación constante del comportamiento a través de la calibración del modelo de simulación para poder predecir el comportamiento del sistema.

3.3.2 Descripción de la curva de consigna

Cuando abastecemos a una población a través de una SAAP, el caudal demandado no será fijo, sino que será impuesto por los usuarios en función de sus necesidades, las cuales son cambiantes. Se sabe, además, que el consumo puede ser variable entre las distintas estaciones del año, así como también de un año para otro, pero, fundamentalmente y en el corto plazo si los días son laborables o no, o si existe alguna ocurrencia puntual en esa población.

La forma en cómo los consumos varían en el tiempo nos indica que la curva resistente de una red será variable, es decir, para cada instante de tiempo tendrá una curva de sistema diferente provocada fundamentalmente por las continuas variaciones en los consumos hechos por los usuarios finales de la red.

A manera de ejemplo, si observamos la Figura 8 y se compara una curva de consumos horaria con el comportamiento de la curva del sistema, se podrá apreciar cómo para cada instante de tiempo varía la curva resistente del sistema.

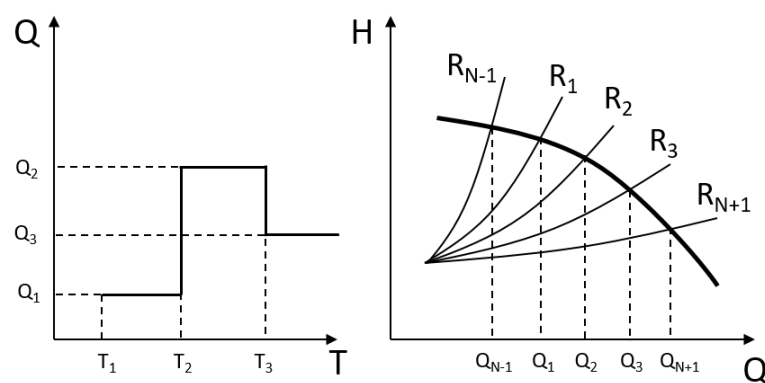


Ilustración 8. Comparativa Curva de modulación y curvas de Sistema

Fuente: (Martínez et al., 2009)

En las redes malladas al variar el consumo en los puntos de consumo podrá cambiar la configuración de los caudales circulantes en cada uno de los tramos y por ende la curva resistente podrá cambiar. Por lo que se puede tener un número n de curvas resistentes para un mismo sistema.

Bajo este punto de vista, podemos definir la curva de consigna de una determinada red de distribución como la altura mínima que tiene que haber en cabecera de la red en cada instante para que en el punto de consumo más desfavorable de la misma se satisfaga la demanda de caudal con el valor de presión residual mínima que garantiza el servicio (Ilaya-Ayza, 2016).

Para obtener la curva de consigna se debe disponer de un modelo fiable de la red de distribución donde se puedan evaluar las pérdidas energéticas para cada estado de carga; así se podrán determinar las presiones necesarias en los puntos de inyección para que las presiones en los puntos más desfavorables de la red cumplan con los requerimientos mínimos

de servicio (Martínez *et al.*, 2009). Así pues, se obtendría la curva de consigna, simplemente graficando los pares ordenados altura de cabecera (presión necesaria en el punto de inyección para el cumplimiento de la presión mínima) y caudal total demandado en la red.

En la figura 9 se puede apreciar una representación gráfica de la curva de consigna con las curvas de sistema y la motriz de bombeo.

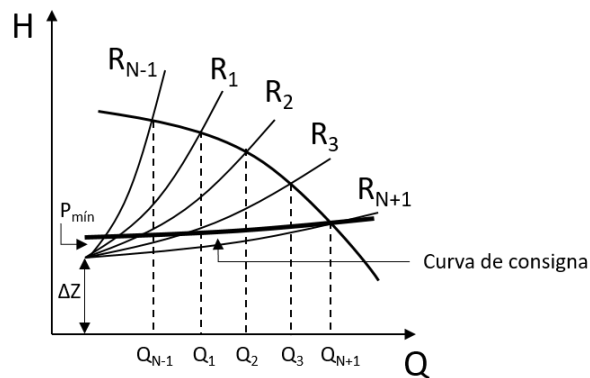


Ilustración 9. Comparativa de curvas

En primer lugar, se aprecia en la figura que la curva de consigna tiene una pendiente más reducida en comparación con las curvas resistentes. Asimismo, con una sola curva de consigna se puede cubrir todo el rango de curvas resistentes que puedan existir para una red, lo cual es una ventaja importante.

En dicha figura la curva de consigna coincide con el punto de intersección de la curva de máximo consumo con la curva motriz de la bomba, lo que se traduce en que en ese punto la curva de consigna entrega el caudal en el nodo más desfavorable con la presión mínima requerida. Pero también se observa que para el resto de los puntos esta se encuentra sensiblemente más abajo que las intersecciones de las curvas de sistema con la curva motriz. Esto se debe a que la curva de consigna en todo momento entrega en el punto más desfavorable la presión mínima necesaria, resultando entonces notable que la diferencia en ordenadas es la presión que existiría en dicho nodo si la regulación fuese realizada con la curva de sistema. Se aprecia entonces que la curva de consigna refleja la altura con la que se satisface cada demanda con la mínima energía posible y, por tanto, con el menor coste posible.

3.3.2.1 Metodología para la determinación de la curva de consigna bajo Análisis Dependiente de la Demanda (DDA)

La obtención de la curva de consigna se puede realizar para redes con una o varias fuentes de suministro, sean estas por bombeo o alimentación directa a través de tanques de cabecera; asimismo, la curva de consigna se puede calcular bajo análisis dependiente de la demanda DDA (*Demand Driven Analysis*) o también bajo análisis dependiente de la presión PDD (*Pressure Driven Demand*).

En el caso de redes con una sola fuente de suministro, el procedimiento a seguir se enumera a continuación:

- 1.- Se fija la presión mínima de servicio en los nodos de la red.
- 2.- Se establece la altura de cabecera de la fuente de suministro.
- 3.- A partir del conocimiento de los caudales medios de consumo en la red y de la variación de estos a lo largo del tiempo, se construye una curva de variación de consumos creciente partiendo del valor mínimo de consumo hasta el máximo.
- 4.- Se modela la red y se determina el nudo crítico de la curva de modulación para cada instante. El nudo crítico será aquel que tenga la presión más baja o el mayor requerimiento de presión para cumplir con la presión mínima de servicio previamente fijada.
- 5.- Se calcula la altura de cabecera requerida para cumplir con el requerimiento de presión mínima originalmente fijada, según la siguiente ecuación:

$$H_{Cab-Nodo} = C_{Fuente} - (P_{nodo} - P_{min}) \quad , \quad (24)$$

donde $H_{Cab-Nodo}$ es la altura de cabecera requerida para cumplir la presión en el nodo, C_{Fuente} es la cota de suministro de la fuente, P_{nodo} es la presión en el nodo de consumo y P_{min} es el valor de presión mínima de servicio establecida para la red.

La altura de cabecera para el estado de carga será el mayor valor obtenido de todos los nodos, ya que, de esta forma, al cumplir la presión mínima para el punto más desfavorable, se cumple para todos los demás nodos. Ahora bien, si se generan varios estados de carga manteniendo una misma presión mínima de servicio, y se repite el proceso anteriormente descrito, se podrá hallar, entonces, la curva de consigna o curva de comportamiento del sistema.

No hay que perder de vista que la altura de cabecera representa la altura piezométrica que se requiere en la fuente para garantizar el caudal; si se desea conocer la presión necesaria en la fuente (en el caso de sistemas por bombeo) bastará con sustraer de la altura de cabecera la cota de la fuente.

En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna bajo la condición de única fuente de alimentación y bajo análisis DDA.

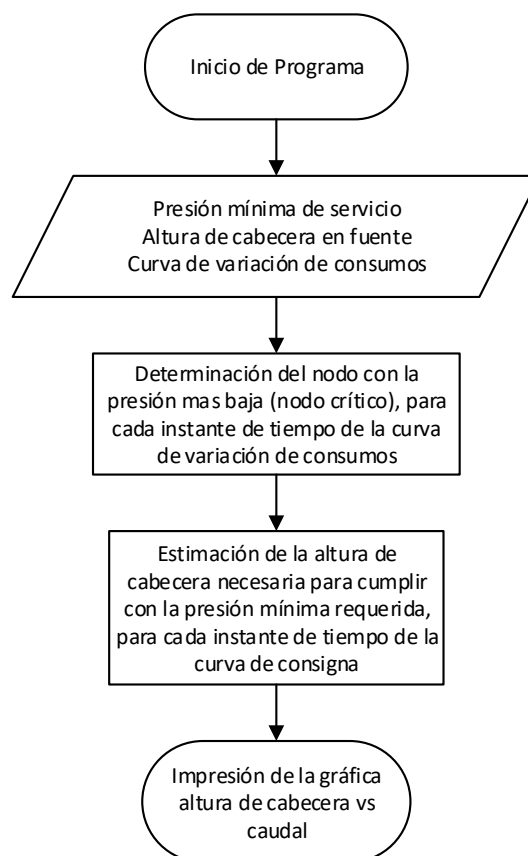


Ilustración 10. Pseudo código para la determinación de la capacidad de la red bajo enfoque DDA

3.3.2.2 Metodología para la determinación de la curva de consigna bajo Análisis de Dependiente de la Presión (PDD)

En el caso de redes con una fuente, pero con consumos dependientes de la presión, se deberá tomar en cuenta que, al establecer una altura de cabecera, cambian inmediatamente los caudales demandados, por lo que se tendrá que iterar la altura de cabecera hasta que el nudo más desfavorable cumpla con la presión mínima requerida. De manera general, el procedimiento es muy similar al planteado anteriormente con la única diferencia del proceso iterativo ya planteado. A continuación, se enumera el procedimiento a seguir:

- 1.- Se fija la presión mínima de servicio en los nodos de la red.
- 2.- Se establece la altura de cabecera de la fuente de suministro.
- 3.- A partir del conocimiento de los caudales medios de consumo en la red y de la variación de estos a lo largo del tiempo, se construye una curva de variación de consumos creciente partiendo del valor mínimo de consumo hasta el máximo.
- 4.- Para el primer instante de consumo en la red se determina el nudo crítico, que será aquel de tenga la presión más baja o el mayor requerimiento de presión para cumplir con la presión mínima de servicio previamente fijada.
- 5.- Se calcula la altura de cabecera requerida para cumplir con el requerimiento de presión mínima originalmente fijada, según la ecuación (24).
- 6.- Se toma la mayor altura de cabecera obtenida y se sustituye esta como la cota de la fuente y se vuelve al paso 4, iniciándose así un proceso iterativo que solo se detendrá cuando no haya más alteración de la altura de cabecera o hasta cumplir con un parámetro de parada. Cumplido esto, se procede al cálculo de la altura de cabecera para el próximo instante de tiempo en la modelación.

En la figura 11 se muestra el diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna bajo la condición de única fuente de alimentación y bajo análisis PDD.

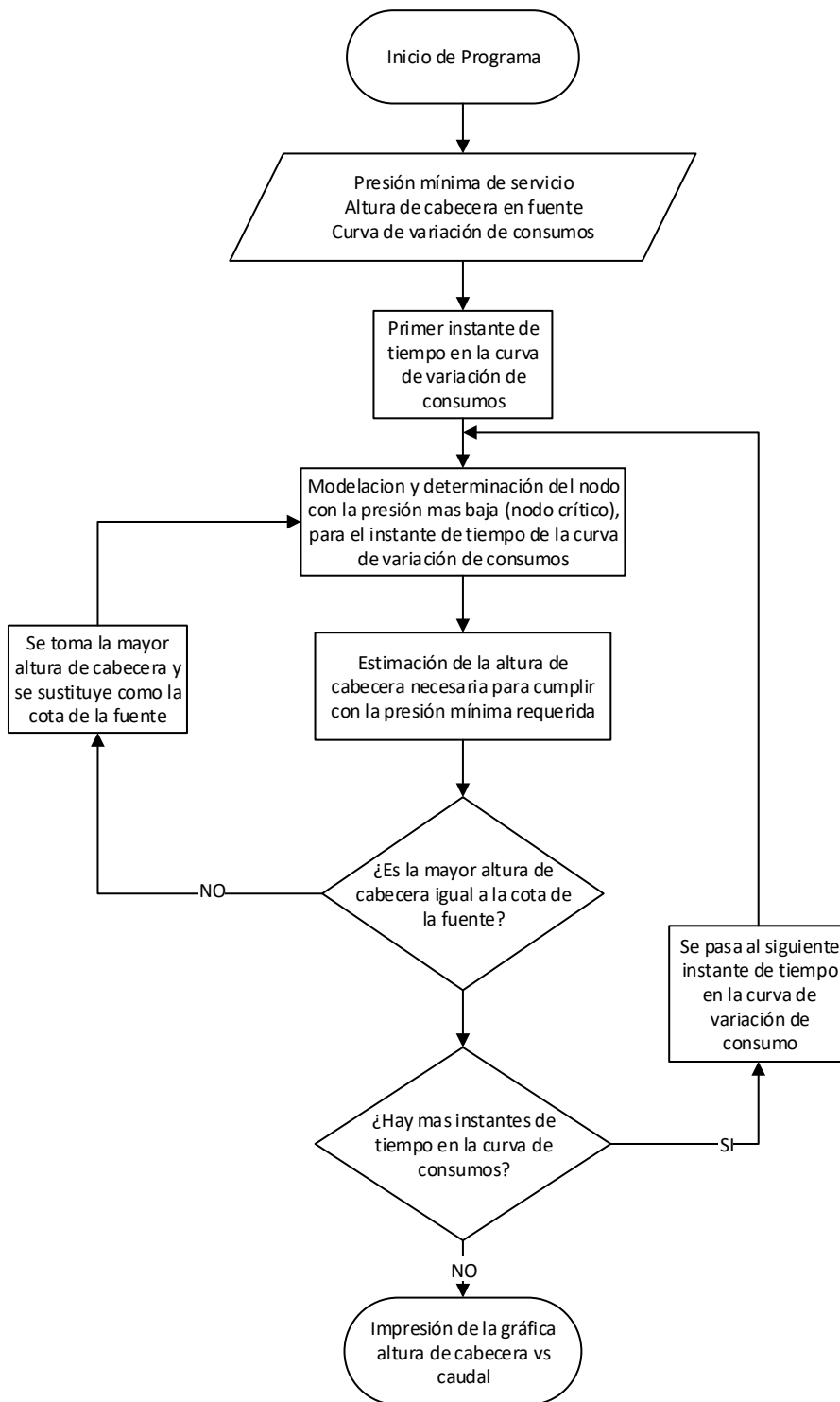


Ilustración 11. Pseudo código para la determinación de la capacidad de la red bajo enfoque PDD

3.3.3 Caudal máximo teórico

Por definición, es el máximo valor de caudal que se puede inyectar a la red garantizando las presiones mínimas residuales impuestas como restricción al funcionamiento. El caudal máximo teórico, se obtiene por un procedimiento a través de la curva de consigna de la red de distribución, y a su vez sirve como el único indicador cuantitativo de la capacidad real de servicio de la red, ya que todos los otros indicadores e índices solo son medidas indirectas de la capacidad de la red (Ilaya-Ayza *et al.*, 2016b).

Este indicador se obtiene a partir de la curva de consigna y en función de la presión mínima de servicio requerida en la red, donde el punto resultante de la intersección de la altura real de la fuente de suministro con la curva de consigna determina el caudal máximo teórico de la red, estableciéndose de esta forma la capacidad de la red.

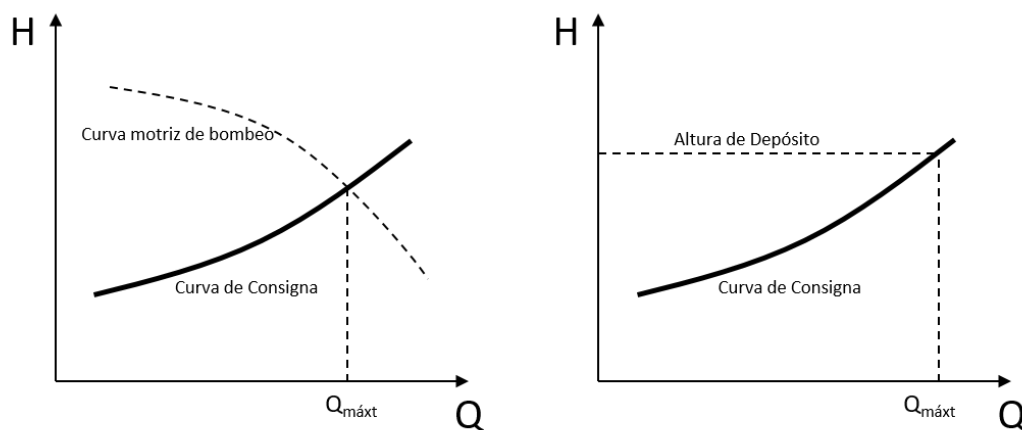


Ilustración 12. Comparativa curva de modulación y curvas de Sistema

Fuente: (Ilaya-Ayza *et al.*, 2016b)

3.4 Caudal máximo teórico y su relación con el índice de resiliencia

Martins *et al.* (2017) plantearon que existe una relación inversa clara entre el caudal máximo teórico y el índice de resiliencia, independiente de la presión de servicio mínima establecida. El estudio se llevó a cabo en la red de prueba originalmente planteada por Ilaya-Ayza *et al.* (2016b) y mostrada en la figura 13.

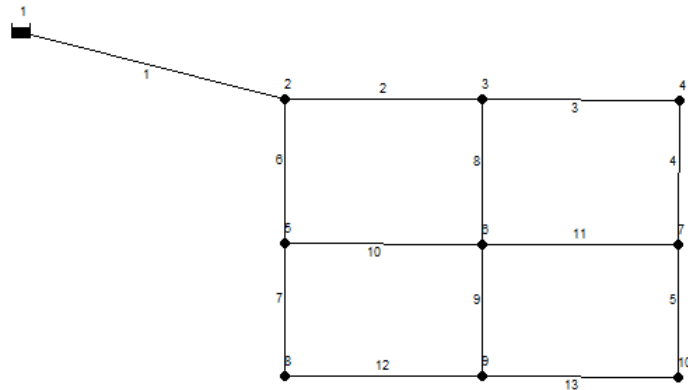


Ilustración 13. Red de prueba de Ilaya

Fuente: (Ilaya-Ayza et al., 2016b)

En el estudio se elaboraron curvas de consigna para valores de presión mínima de servicio de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mca, en modelaciones bajo enfoque DDA y PDD, obteniéndose todo el espectro posible de operación de dicha red, según las gráficas mostradas en la figura 14.

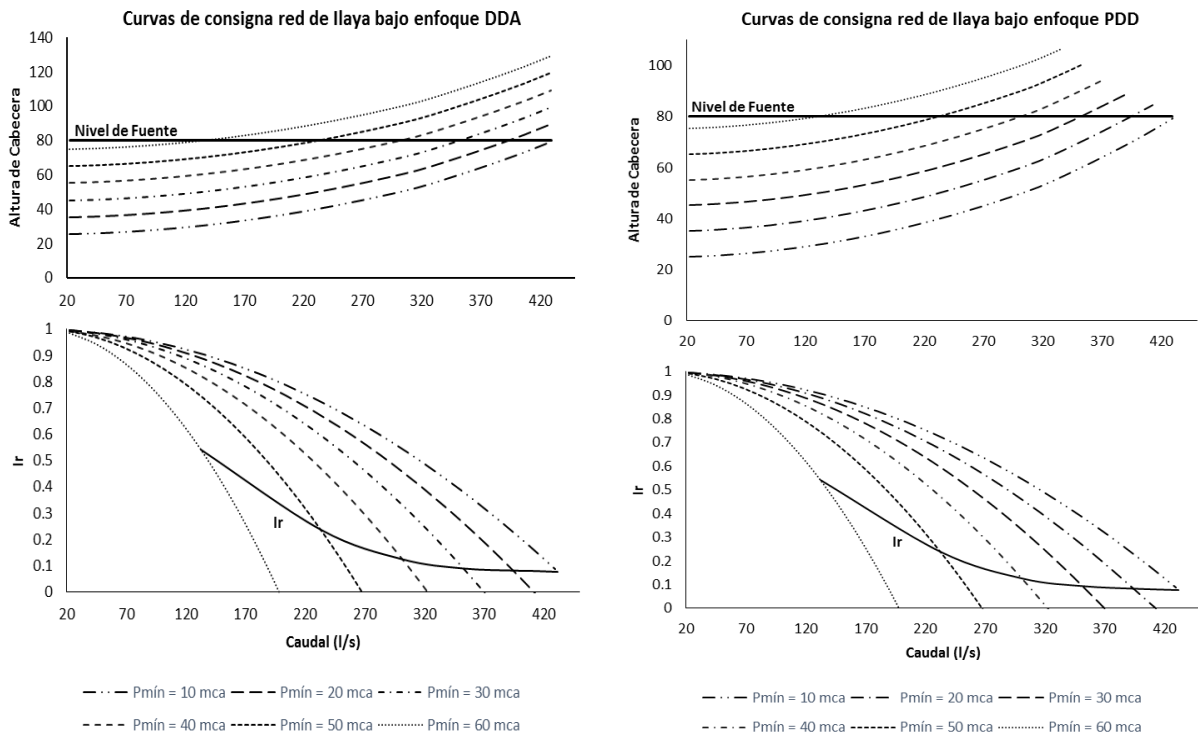


Ilustración 14. Grupo de curvas de consigna de red de llaya

Fuente: (Martins et al., 2017)

Se pudo apreciar que para ambos enfoques el punto de intersección entre el nivel real de la fuente y las curvas de consigna representa al caudal máximo teórico que puede aportar la red. Partiendo de este punto, se estableció que a menor presión mínima de servicio el caudal máximo teórico que puede aportar la red es mayor. Asimismo, desplazándose desde el punto de intersección hacia la gráfica inferior, se obtuvo el índice de resiliencia con el que trabaja la red para dicho caudal máximo teórico. Se concluyó que, para ambos enfoques, a medida que el caudal máximo teórico se incrementa, se reduce el índice de resiliencia con el que funciona la red.

Si bien las curvas de Caudal vs Altura de Cabecera cambiaron un poco en los enfoques DDA y PDD, se pudo apreciar que el comportamiento del índice de resiliencia para todas las presiones mínimas de servicio evaluadas es muy similar tal como se puede apreciar en la Tabla 1 y la figura 15.

Tabla 1. Resultados de la Red de Ilaya

Enfoque	Pmín	Caudal Máx teórico (l/s)	Ir
DDA	10	431.96	0.08
	20	394.26	0.08
	30	352.59	0.09
	40	301.46	0.12
	50	232.90	0.24
	60	132.38	0.54
PDD	10	431.97	0.08
	20	394.50	0.08
	30	352.44	0.09
	40	301.89	0.12
	50	232.65	0.24
	60	132.37	0.54

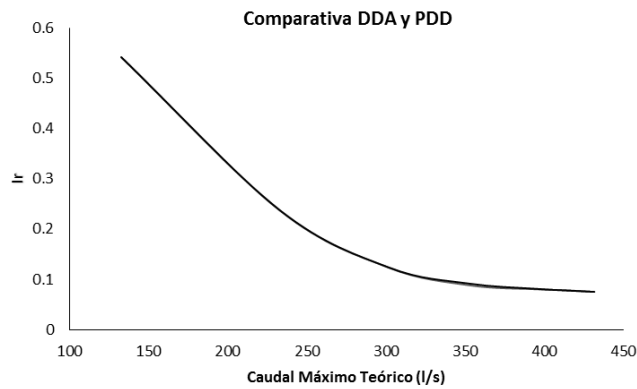


Ilustración 15. Comparativa IR de DDA y PDD red de Ilaya

Fuente: (Martins et al., 2017)

En este orden de ideas, del estudio se concluye que existe una relación clara entre el índice de resiliencia y el caudal máximo teórico, ya que se pudo verificar que, a medida que este último incrementa, el valor de la resiliencia disminuye, significando esto que la red tiene

menos posibilidades de sobreponerse a eventualidades que pudieran afectar su funcionamiento. Asimismo, esto se cumple para cualquier presión de funcionamiento mínima impuesta, ya que el desarrollo de las curvas se comporta de forma idéntica. Todo esto es debido a que el incremento de la capacidad de la red está asociado con un incremento del gasto, que, a su vez, incide en una disminución de las presiones y, por ende, en una disminución del índice de resiliencia.

4. DETECCIÓN DE COMUNIDADES

4. DETECCIÓN DE COMUNIDADES

La física, la biología y las ciencias humanas son tan solo algunas de las variadas áreas donde se emplea el modelado de redes para su análisis. El descubrimiento de la forma en que se comportan estas redes ha servido de insumo para su aplicación en otros sistemas. Por ejemplo, las redes sociales que, en un principio, fueron estudiadas por las ciencias humanas, hoy en día exportan sus analogías y principios a variadas áreas tales como la ingeniería, estadística y las ciencias informáticas.

Para llevar a cabo el estudio de redes se aplica la llamada teoría de grafos, donde se identifican las entidades como “nodos” o “vértices” y las relaciones como “enlaces” o “aristas”. Para poder ahondar en los métodos de detección de comunidades se expondrán brevemente algunos conceptos básicos.

4.1 Grafos

Los grafos son una herramienta básica para modelar fenómenos discretos y son fundamentales para la comprensión de las estructuras de datos. Asimismo, el concepto más básico de red se conoce también como grafo (Meza y Ortega, 2006).

En matemáticas e informática, la teoría de grafos estudia las propiedades de los grafos, que básicamente son estructuras discretas conformadas por grupos de elementos denominados vértices (o nodos) unidos mediante líneas llamadas aristas, que pueden incorporar orientación (dirección definida). Normalmente, un grafo está compuesto por una serie de puntos (los vértices) conectados por líneas (las aristas).

Utilizando una notación formal, un grafo G es una terna (V, E, φ) , donde V es un conjunto no vacío finito de elementos llamados vértices o nodos del grafo, E es un conjunto finito de elementos llamados lados y φ es una función que asigna a cada elemento de E un par de elementos de V . La función φ es llamada función de incidencia.

Si los pares de elementos no son ordenados decimos que el grafo es no orientado o no dirigido y sus lados se llaman aristas. En el caso de que todos los pares $\{a, b\}$ sean ordenados, se denotan como (a, b) y se les llama arcos; en este caso el grafo es orientado o dirigido y se le llama también digrafo.

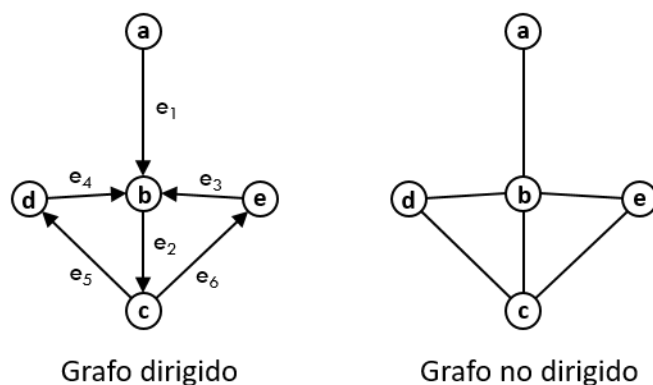


Ilustración 16. Ejemplos de grafo dirigido y no dirigido

Es muy común usar también como notación para el grafo directamente el par (V, E) sin incluir la función φ . En este caso, un lado del grafo representará en sí mismo el par que le asociaría la función φ . Se puede denotar, por ejemplo: $e = \{a, b\}$, con $e \in E$.

Cada uno de los nodos que conforman un lado del grafo se llama extremo del lado. Si el grafo es dirigido u orientado, entonces si $e = (a, b)$ es un arco del grafo, el nodo a será su extremo inicial y el nodo b su extremo terminal o final. Además, dos nodos que conforman un lado de un grafo se les dice adyacentes. Asimismo, un lado es incidente en cada uno de sus extremos. Igualmente, dos lados que posean un extremo común se les denomina adyacentes. Si G es dirigido, los sucesores de un vértice a son los vértices terminales de los arcos cuyo extremo inicial es a , los predecesores son los vértices iniciales de los arcos con vértice terminal a (Meza y Ortega, 2006).

Se llama vecindad o conjunto de adyacencias de un nodo a al conjunto de nodos adyacentes a a . Un nodo cuya vecindad es él mismo o el conjunto vacío se llama vértice aislado. Un lazo o bucle es un lado cuyos dos extremos coinciden. Asimismo, se llama valencia (o grado) de un vértice a , al número de lados incidentes en a .

4.2 Representación de grafos

Las matrices proporcionan otra forma de representar grafos. Este tipo de representación es de gran utilidad para su tratamiento algebraico y para procesos computacionales, de ahí que los grafos se puedan representar a través de tres estructuras de datos distintos.

4.2.1 Lista de adyacencia

Una manera común de representar un grafo es haciendo uso de estructuras dinámicas de datos como la lista de adyacencia. En el caso de grafos no dirigidos, a cada vértice a está asociada una lista de los vértices que son el otro extremo de las aristas incidentes al vértice a . En el caso de grafos dirigidos, a cada vértice a asociamos la lista de los vértices que son terminales de los arcos con extremo inicial a .

4.2.2 Matriz de adyacencia

La matriz de adyacencia de dimensiones $|V| \times |V|$, siendo $|V| = \text{card}(V)$, asociada a un grafo no orientado $G = (V, E)$, es una matriz, $A(G) = [a_{ij}]$, en las que las filas y las columnas representan elementos de V . Una entrada a_{ij} representa el número de aristas de G , cuyos extremos son los vértices correspondientes a i y j .

En las figuras siguientes se presentan las matrices de adyacencia de los grafos representados en la figura 16.

	a	b	c	d	e
a	0	1	0	0	0
b	0	0	1	0	0
c	0	0	0	1	1
d	0	1	0	0	0
e	0	1	0	0	0

Ilustración 17. Matriz de adyacencia del grafo dirigido de la Ilustración 16

	a	b	c	d	e
a	0	1	0	0	0
b	1	0	1	1	1
c	0	1	0	1	1
d	0	1	1	0	0
e	0	1	1	0	0

Ilustración 18. Matriz de adyacencia del grafo no dirigido de la Ilustración 16

Es importante resaltar que para cualquier tipo de grafo no dirigido la matriz de adyacencia es simétrica respecto a la diagonal principal, y si el grafo no tiene bucles, todos los elementos de la diagonal principal son cero.

Entre otras características, tendremos que todas las matrices de adyacencia serán cuadradas y la valencia de un vértice se obtiene mediante la suma de la fila o columna correspondiente.

4.2.3 Matriz de incidencia

La matriz de incidencia asociada a un grafo $G = (V, E)$ es una matriz $|V| \times |E|$, donde las filas representan los nodos del grafo y las columnas los lados o aristas del mismo. En el caso del grafo ser no dirigido, las entradas (i, j) de la matriz tendrán el siguiente valor:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{Si el vertice } i \text{ es extremo del lado } j \\ 0 & \text{Cualquier otro caso} \end{cases}$$

Si el grafo es dirigido, entonces las entradas de la matriz serán:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{Si el nodo de la fila } i \text{ es el extremo terminal del arco } j \\ -1 & \text{Si el nodo de la fila } i \text{ es el extremo inicial del arco } j \\ 0 & \text{Cualquier otro caso} \end{cases}$$

En la figura siguiente se presenta la matriz de incidencia del grafo dirigido representado en la figura 16.

	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆
a	-1	0	0	0	0	0
b	1	-1	1	1	0	0
c	0	1	0	0	-1	-1
d	0	0	0	-1	1	0
e	0	0	1	0	0	1

Ilustración 19. Matriz de incidencia del grafo dirigido de la Ilustración 16

Es importante destacar que la representación de un grafo dirigido por su matriz de incidencia no es significativa si el grafo posee bucles, pues dos grafos diferentes podrían tener la misma matriz de incidencia. También se pueden destacar otras características de la matriz de incidencia tales como:

- a.- Permite representar lados paralelos y lazos de manera simultánea.
- b.- La suma absoluta de cada fila da como resultado la valencia del vértice correspondiente.
- c.- Dos columnas con valores iguales representan lados o aristas paralelas.

4.3 Comunidades

Etimológicamente, comunidad tiene su origen en el vocablo latino *communitas*, y se refiere a un conjunto, un grupo de individuos o una asociación, que puede ser de seres humanos, de animales o de cualquier otro tipo de vida, que comparten intereses, elementos, propiedades u objetivos en común.

Así pues, el objetivo principal de la detección de comunidades en grafos o redes (en un sentido matemático estricto un grafo es la simplificación de una red (Meza y Ortega, 2006)), es identificar los módulos o agrupamientos y su posible estructura jerárquica, aprovechando la información topológica. A una comunidad también se le puede llamar clúster o módulo, el cual es formado por un grupo de vértices que poseen propiedades comunes o desempeñan una función similar dentro de la red.

Establecer de forma absoluta qué es una comunidad dependerá del punto de vista desde el cual se estudia, ya que cada enfoque tendrá una conceptualización diferente. Desde el punto de vista social, se define como un grupo de personas con intereses afines o actividades en común (Fortunato, 2010). Sin embargo, Newman (2006a) propone como definición que una comunidad (desde el punto de vista de las redes) es la división de los nodos de una red en grupos dentro de los cuales las conexiones son más densas o fuertes dentro de los integrantes de un grupo pero escasa con los integrantes de otros grupos.

En la figura 20 se puede observar a nivel esquemático cómo es la definición de comunidades en redes.

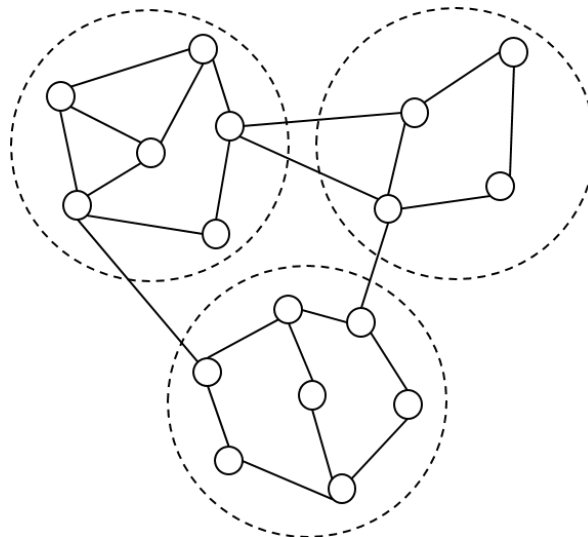


Ilustración 20. Esquema de comunidades en redes

Se aprecia que la red o grafo está conformada por tres comunidades o agrupamientos claramente definidos, donde la cantidad o densidad de conexiones entre sus elementos es más grande entre los nodos que son propios de cada comunidad que con relación al resto de

los nodos de las otras comunidades. A los agrupamientos mostrados, típicamente se les denomina clúster y al conjunto señalado en la figura se le denomina partición.

Bajo esta filosofía, la idea intuitiva común a la gran mayoría de las publicaciones utilizada para determinar qué es una comunidad en las redes (o grafos), es que los nodos de dicha comunidad deben estar más relacionados entre sí, que con el resto de los nodos de la red. Utilizando como base esta idea general se han propuestos diversos criterios para definir qué es una comunidad. Estos criterios se corresponden con:

a.- Definiciones locales: se analiza la estructura interna de la comunidad, sin tener en cuenta el resto de la red, ya que, desde una visión local, existe una mayor cohesión entre los nodos dentro de la comunidad que entre los externos a ella, y, partiendo de ella, se analiza la comunidad de forma independiente del resto de los elementos.

b.- Definiciones globales: se analiza el papel de la comunidad en la estructura global de la red, esta definición se basa en la premisa de que la definición local no es aplicable ya que la comunidad no se puede aislar debido a que forma parte importante de la estructura de la red.

c.- Definiciones en base a la similitud: parte de la idea de que los elementos de una comunidad tienen características similares entre sí. En este caso, es preciso identificar cómo cuantificar esta similitud, bien sea que los nodos este conectados o no mediante aristas o lados.

Obviamente, entonces, se necesita una forma de evaluar o medir qué objetos son más similares entre sí para realizar estos agrupamientos.

4.4 Medidas en comunidades

Debido a la variedad de enfoques que existen en la actualidad para definir una comunidad, existen también diferentes características que se pueden tomar en cuenta para generar una comunidad dentro de una red; todo esto tiene como consecuencia la amplitud de áreas que puede ser abarcada por la detección de comunidades (ciencias de la computación, física, biología, sociología entre otras).

4.4.1 Medidas relacionadas con la distancia

En un grafo $G = (V, E)$ la distancia geodésica es la menor distancia que pueda existir entre dos nodos i y j y se representa de la forma d_{ij} . Esta distancia puede representar proporcionalidad a la distancia física o bien la fortaleza de las conexiones entre los dos nodos incidentes.

Debido a la importancia de este tipo de medida, se mencionan a continuación dos definiciones de medidas basadas en la distancia, siendo la primera de ellas la distancia geodésica promedio, la cual viene expresada por la siguiente ecuación:

$$l = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad , \quad (25)$$

donde, N es el número de conexiones que conectan los nodos i y j .

La otra medida basada en la distancia, y muy usada, es la vulnerabilidad; en este caso, se parte del principio de que la eficiencia de las conexiones es la sumatoria del inverso de la distancia de las conexiones entre dos nodos i y j , tal y como se expresa en la ecuación

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad . \quad (26)$$

Siendo así, la vulnerabilidad se expresa como la disminución en la eficiencia de la red cuando es eliminado un nodo i y todas las conexiones asociadas a él, quedando expresada según la ecuación

$$V_i = \frac{E - E_i}{E} \quad , \quad (27)$$

donde, E esta definida como la eficiencia global de la red original y E_i es la eficiencia global después de remover el vértice i y todas sus conexiones asociadas.

4.4.2 Medidas relacionadas con el coeficiente de agrupamiento

Otra métrica muy usada evalúa qué tan interrelacionados están los nodos a través de la evaluación del número de triángulos que puedan formar sus conexiones con otros nodos. Son usados comúnmente dos tipos de coeficientes de agrupamiento; el primero de ellos es llamado también coeficiente de transitividad, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{3N_{\Delta}}{N_3} \quad , \quad (28)$$

donde, N_{Δ} es el número de triángulos en la red y N_3 es el número de vértices de los triángulos que pueden ser alcanzados por otro triángulo, todo esto de acuerdo a las ecuaciones mostradas a continuación:

$$N_{\Delta} = \sum_{k>j>i} a_{ij}a_{ik}a_{jk} \quad , \quad (29)$$

$$N_3 = \sum_{k>j>i} (a_{ij}a_{ik} + a_{ji}a_{jk} + a_{ki}a_{kj}) \quad , \quad (30)$$

donde, a_{ij} son los elementos de la matriz de adyacencia.

El segundo coeficiente de agrupamiento toma en cuenta los triángulos, pero referidos o asociados a cada uno de los vértices del grafo y en este caso esta expresado por la ecuación

$$C_i = \frac{N_{\Delta}(i)}{N_3(i)} \quad , \quad (31)$$

donde, $N_{\Delta}(i)$ es el número de triángulos que involucran al vértice i y $N_3(i)$ es el número de triángulos que se pueden alcanzar teniendo al vértice i como nodo central.

4.4.3 Medidas basadas con la centralidad o importancia

Las medidas basadas en la centralidad se fundamentan en la importancia que puede tener un nodo dentro de una agrupación. Dentro de este tipo de medidas hay diferentes variantes en función de la definición anteriormente expresada.

La más simple de todas es la centralidad de grado (*centrality*), la cual se basa en la idea de que los vértices con mayor grado (mayor número de aristas conectadas a él) deberán estar en una posición más privilegiada en la red y por lo tanto ser más importantes. Queda definido el grado de un nodo por la ecuación

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad . \quad (32)$$

Asimismo, el grado medio de una red será

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \quad (33)$$

Por otro lado, la centralidad por proximidad (*closeness*) está definida a partir de la media de las distancias geodésicas del nodo a todos los otros nodos alcanzables, significando que cuanto mayor sea la distancia media, menor es la importancia del nodo y viceversa, según lo planteado en la ecuación

$$C_C(i) = \frac{n}{\sum_{j=1}^n d_{ij}} \quad (34)$$

La centralidad de intermediación (*betweenness*), por otro lado, considera todos los caminos mínimos entre pares de vértices de una red, donde los vértices que pertenecen a un número mayor de caminos mínimos son los que poseen mayor intermediación. Esta medida es determinada para cada vértice e mediante la ecuación

$$C_B(e) = \sum_{u,v \in V} \frac{g_e(u,v)}{g(u,v)} \quad (35)$$

donde, $g(u,v)$ es el número de caminos mínimos entre los nodos u y v , y $g_e(u,v)$ es el número de caminos mínimos entre los nodos u y v que pasan por el nodo e .

La centralidad por autovector se basa en las conexiones que tenga el nodo con otros nodos de similar importancia; es decir, no solo se basa en la cantidad de conexiones sino en la importancia de los nodos con los que se conecta. En este tipo de medida está basado el método *PageRank* el cual sirvió de base para el motor de búsquedas de Google (Newman, 2010).

La centralidad por autovector está definida por la ecuación

$$C_e(i) = \frac{1}{\rho} \sum_j a_{ij} x_j \quad (36)$$

donde, ρ es el autovalor de Perron de la matriz de adyacencia y x_j es la j -ésima componente del autovector asociado, adecuadamente normalizado.

En esta medida de centralidad, el valor de la centralidad de cada vértice dependerá del número y de la calidad de las conexiones que tiene, es decir que no es solo importante tener un número importante de conexiones, también será necesario tener conexiones de calidad.

4.4.4 Medidas basadas en la modularidad

La presencia de agrupaciones o comunidades dentro de las redes se deduce generalmente de la no homogeneidad de las conexiones entre distintos grupos de nodos en una red; esto hace inferir que una comunidad tendrá una interconexión más densa entre sus nodos que con los del resto de la red.

El índice de modularidad propuesto por Newman (2006) se fundamenta en la medición de las densidades dentro y fuera de la comunidades y comparándolas con la densidad general de la red, si esta fuese construida de manera aleatoria. De manera general, está definida por la ecuación

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left(a_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(c_i, c_j) \quad , \quad (37)$$

donde, Q es el índice de modularidad para la partición, m es el número de aristas, k_i es el grado del nodo i , k_j es el grado del nodo j , δ es una función binaria que toma como valor uno si los nodos i y j están en la misma comunidad ($c_i = c_j$) y cero en caso contrario.

Una característica muy útil de la modularidad es que, no solamente indica qué tan buena es una partición mediante valores positivos (entre 0 y 1), sino que también puede describir qué tan malo es un agrupamiento mediante valores negativos. En ese caso, una partición con valores negativos, implica la existencia de grupos de baja densidad interna que interactúan mucho más con el resto de la red. Si en una red no hay particiones con modularidad positiva, entonces se asume que dicha red no posee una estructuración basada en comunidades (Fortunato, 2010).

4.5 Métodos para la detección de comunidades

Para la detección de comunidades en grafos o redes se han planteado variados métodos, los cuales básicamente están agrupados en cuatro grandes familias, a saber, métodos particionales, métodos jerárquicos, métodos espectrales y métodos basados en la optimización de la modularidad.

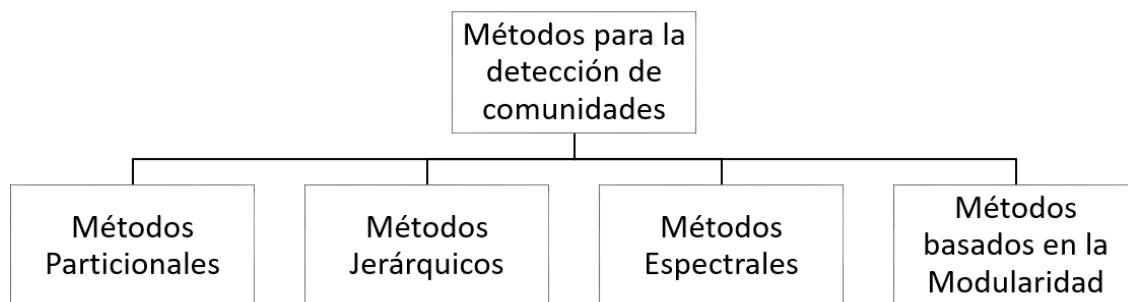


Ilustración 21. Esquema demostrativo de los métodos básicos de detección de comunidades

En primer lugar, los métodos particionales se basan en la filosofía de dividir los vértices en k grupos de un tamaño predefinido; es decir, se debe entregar de antemano el número de grupos y, en general, esto es una de las interrogantes del problema. En esta familia cohabitan dos grandes subgrupos; por un lado están los métodos que se basan en minimizar el número de cortes en las aristas y en el cual tenemos como mayor exponente el método de Kerninghan-Lin (Fortunato, 2010). Por otro lado, tenemos el otro subgrupo, en el cual es necesario embeber el grafo bajo una métrica espacial, de tal manera de que cada nodo se encuentre a una distancia respecto a cada uno del resto de nodos que componen el grafo. Esta distancia puede ser una medida de similitud o de disimilitud. Entre los exponentes más notables de este subgrupo tenemos k-means y fuzzy k-means (Newman, 2010); sin embargo, estas técnicas están principalmente asociadas a puntos por lo que su aplicación a redes puede generar problemas de agrupar en un mismo clúster nodos que geodésicamente sean cercanos pero que no dispongan de ninguna relación entre ellos. Otro problema de estos métodos es que se debe entregar de antemano el número de grupos k , lo cual es muy difícil de conocer a priori. Además, estas estrategias resultan no ser del todo adecuadas para la búsqueda de comunidades. Sin embargo, ha sido una herramienta fundamental en el progreso de la computación paralela, debido a su aplicación en la división de procesos en núcleos.

Debido a que cuando se enfrenta problemas de detección de comunidades es muy poco probable conocer el número de clústeres que se puedan formar, se han aplicado otros métodos de forma de superar esta limitación. Los métodos de agrupamiento jerárquico tratan de descubrir si existe una jerarquía entre los distintos elementos de la red, ya que esta permitirá revelar la existencia de una estructura multinivel, la cual es muy común en redes sociales, biológicas y de mercado, entre otras, donde cohabiten comunidades.

El conjunto de métodos jerárquicos se divide principalmente en dos ramas de algoritmos ya que funcionan en sentido opuesto:

a.- Algoritmos aglomerativos: En este caso cada nodo es inicialmente considerado un clúster y recursivamente se fusionan con otros nodos similares más cercanos conformando nuevos clústeres deteniéndose cuando solo exista un único agrupamiento.

b.- Algoritmos divisivos: inician considerando la red entera como un único clúster o agrupamiento; luego iterativamente van dividiéndose en clústeres más pequeños deteniéndose el algoritmo cuando cada nodo es un clúster aislado.

La forma típica de representación de los resultados de estos algoritmos es a través de un dendograma, tal y como se muestra en la figura 22, donde para cada altura se puede apreciar cuántas comunidades pueden formarse.

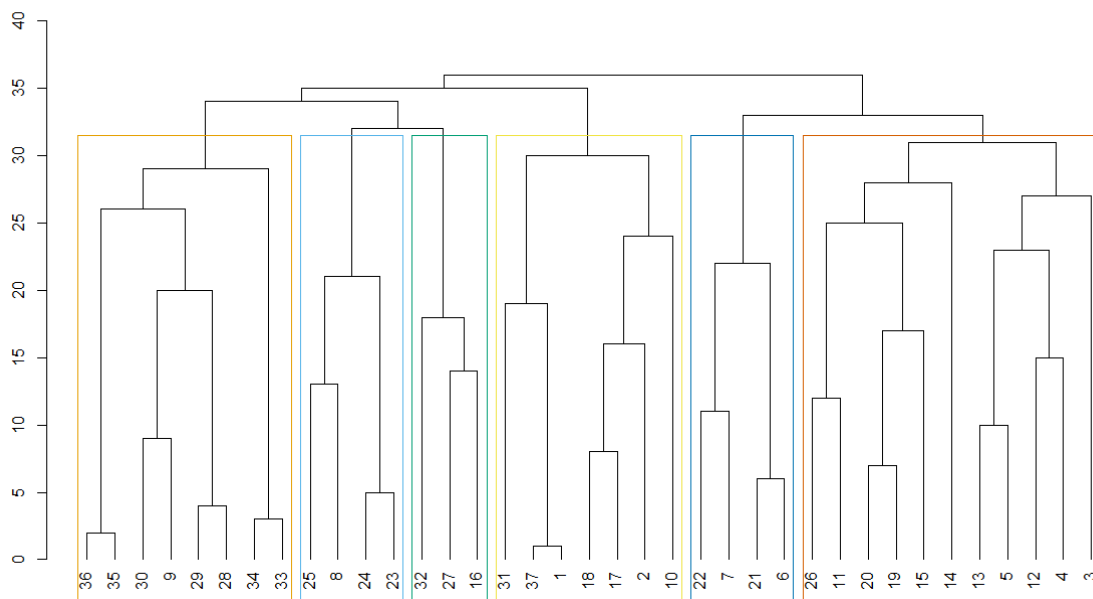


Ilustración 22. Dendograma típico

Por otro lado, tenemos la familia de los métodos espectrales. Esta familia de métodos realiza la partición de los grafos apoyándose en el uso de los autovectores, de tal forma que las comunidades sean lo más disjuntas posibles. Estos métodos consisten en dos pasos básicos, a saber:

- 1.- Transformar los nodos en un conjunto de puntos embebidos dentro de un espacio métrico y obtener los autovectores, todo esto a través del Laplaciano del grafo.
- 2.- Los puntos de los autovectores se agrupan por medio de la aplicación de cualquier técnica de partición de grupos de puntos.

Como desventaja fundamental de estos métodos se encuentra que, ocasionado por su complejidad, tiene altos requerimientos de cómputo y memoria, además de ser lentos.

Por último, tenemos los métodos basados en la maximización de la función de modularidad de Newman y que hoy en día es la familia de métodos con mayor aceptación para la determinación de agrupamientos y más usados recientemente en los problemas de sectorización (Campbell et al., 2016; Diao et al., 2013). Tienen como principal ventaja la rapidez de funcionamiento y calidad en los resultados.

Así pues, partiendo del conocimiento de las familias principales de los métodos de detección de comunidades se seleccionaron seis algoritmos para ser usados en el desarrollo de este trabajo. Los primeros cinco métodos se seleccionaron por encontrarse disponibles de forma libre en el paquete informático Igraph (Csardi y Nepusz, 2006), mientras que el último método fue seleccionado por ser el más novel dentro de la revisión bibliográfica realizada y por no haber sido aún elaborado ningún estudio dentro del área de la sectorización de redes con él.

4.5.1 Algoritmo *fast greedy*

Este algoritmo fue presentado por Clauset *et al.* (2004); consiste básicamente en encontrar los clústeres de acuerdo a un valor de modularidad asignado a cada subgrafo dentro de la red. Fue el primer algoritmo planteado como optimizador de la modularidad, y es un método jerárquico aglomerativo, donde los nodos son sucesivamente unidos para formar comunidades de mayor tamaño tratando en cada paso de incrementar la modularidad de la partición hallada.

El funcionamiento del algoritmo consiste en encontrar los cambios en la modularidad Q que se derivarían de fusionar comunidades. Una forma de entender este método es pensar en la red como un conjunto de grafos, en la que toda la comunidad está representada por un nodo y los vínculos internos de esa comunidad están representados por autoaristas.

Así pues, la matriz de adyacencia original cambiará y, en lugar de tener la distancia simple entre dos nodos, se tendrá la sumatoria de los vínculos internos de la comunidad, lo que generará, a su vez, una variación en la modularidad por cada combinación de fusión de comunidades. El algoritmo se desarrolla básicamente en tres pasos.

- 1.- Calcular los valores iniciales de variación de la modularidad por la unión de los nodos con cada uno de sus vecinos más cercanos.
- 2.- Tomar el valor de variación de la modularidad mayor, y unir las comunidades correspondientes a ese aumento en la modularidad, y recalcular nuevamente los valores de modularidad por la unión con los vecinos.
- 3.- Repetir el paso dos hasta que solo surja una única comunidad.

Este algoritmo tiene como ventaja su rapidez y que, además, puede ser aplicado en redes de gran tamaño.

4.5.2 Algoritmo *edge betweenness*

Es un método históricamente importante porque marca el inicio de la detección de comunidades y la apertura de este tema hacia el campo de la física. Presentado por Newman y Girvan (2004), es un método jerárquico divisivo, en el cual se calcula para cada arista o tramo la intermediación de esta, de acuerdo a alguna propiedad intrínseca de la red; posteriormente, se elimina la arista con mayor intermediación, y estos pasos son repetidos iterativamente hasta lograr la división completa del grafo. El algoritmo se desarrolla en cuatro pasos, a saber:

- 1.- Calcular la medida de intermediación para todos los tramos de la red.
- 2.- Eliminar el vínculo o tramo que obtuvo el mayor valor de intermediación (por el que pasan un mayor número de caminos más cortos).

3.- Recalcular la medida de intermediación para los restantes tramos de la red.

4.- Repetir desde el segundo paso, hasta que no quede ningún tramo restante.

A través de este procedimiento se obtiene una estructura con una jerarquía, la cual, mediante su representación a través de un dendograma, permite establecer la división en comunidades. Sin embargo, esta estructura obtenida requiere de un criterio adicional para poder determinar cuál es la mejor partición de las obtenidas.

El criterio adicional utilizado para encontrar el número óptimo de comunidades consiste en maximizar la medida de la modularidad en la red. Sabiendo que esta medida toma valores entre 0 y 1, esta es calculada tras la eliminación de cada tramo con mayor valor de intermediación. Así pues, existirá un valor de modularidad para cada uno de los niveles del dendograma, eligiéndose la partición que obtuvo mayor modularidad.

4.5.3 Algoritmo *Louvain*

Este algoritmo es también un método jerárquico aglomerativo que trabaja de forma voraz tratando de optimizar la modularidad. Disfruta de una gran aceptación por su rendimiento y fue originalmente propuesto por Blondel *et al.* (2008); funciona en dos pasos:

1.- Cada nodo representa una comunidad inicialmente.

2.- Cada uno de los nodos hace un barrido entre sus vecinos evaluando cómo varía su modularidad al unirse con ellos, adoptando la comunidad del vecino que genere un aumento en su modularidad.

Después de esa primera etapa queda establecido el primer nivel de partición y las comunidades establecidas pasan a llamarse supernodos, y el nuevo cálculo o barrido se hace contra la información del peso de estos supernodos.

El algoritmo es de los más efectivos debido a que funciona en tiempo logarítmico $O(n \log n)$; sin embargo, esta técnica tiene algún problema con las redes grandes debido al requerimiento de memoria, pero existen reportes de que se han obtenido mejores resultados que con la aplicación del algoritmo *fast greedy* de Clauset (Fortunato, 2010).

4.5.4 Algoritmo *walktrap*

Este algoritmo se basa en una nueva tendencia de algoritmos dinámicos basados en la interacción de agentes dentro de las redes; es decir, para la detección de comunidades no es necesario recurrir a la eliminación de tramos ni a la división de grafos. Presentado por Pons y Latapy (2005), se basa en la idea de que un caminante, al recorrer aleatoriamente una red a través de sus tramos, es posible que quede “atrapado” en componentes de la red que estén más densamente conectadas, que se consideran comunidades.

El algoritmo está compuesto principalmente por 7 pasos:

- 1.- Elegir aleatoriamente un nodo n , que será el punto de partida del algoritmo y que representa una partición inicial P_1 .
- 2.- Calcular todas las distancias entre los nodos adyacentes, es decir, desde el nodo n elegido aleatoriamente y sus vecinos.
- 3.- Se define el número de pasos de recorrido por comunidades.
- 4.- Elegir dos comunidades C_1 y C_2 en la partición P_k de acuerdo con un criterio de distancia entre comunidades.
- 5.- Unir las comunidades halladas en el paso anterior en $C_3 = C_1 \cup C_2$ y crear una nueva partición $P_{k+1} = (P_k \setminus \{C_1, C_2\}) \cup \{C_3\}$.
- 6.- Calcular y actualizar las distancias entre las comunidades.
- 7.- Repetir el proceso a partir de 4 hasta obtener una partición que contenga todos los nodos del grafo.

Este algoritmo tiene como ventaja permitir encontrar comunidades a diferentes escalas o tamaños; asimismo, el número de pasos habrá de ser suficientemente grande para poder explorar gran parte del grafo, pero no tan grande como para permitir la transición a otras áreas. Existen reportes de que este método es más rápido y con resultados comparables a los obtenidos en las redes de prueba por el algoritmo de Newman y Girvan (Fortunato, 2010).

4.5.5 Algoritmo *infomap*

Este método de reciente data está basado en los principios de la estadística inferencial, es decir, trata de deducir propiedades de las redes a partir de las observaciones sobre el modelo. Asimismo, es el único de los algoritmos presentados que no se basa en el principio de optimización de la modularidad. Este algoritmo, desarrollado por Rosvall *et al.* (2009), caracteriza el problema de encontrar la agrupación óptima en una red como el problema de encontrar una descripción de la información mínima que requiere un caminante para recorrer el grafo.

Este algoritmo se diferencia de los anteriores ya que no busca maximizar una cualidad o establecer un patrón de búsqueda intra clúster. Está basado en la teoría de la información originalmente planteada por Shannon (1948), donde el flujo de datos puede ser comprimido por un código. En este caso, para los autores, el problema de encontrar la mejor partición es expresado como la mínima cantidad de información necesaria para representar un caminante aleatorio en la red. Si una partición tiene unos pocos vínculos con otras comunidades, es más probable que el caminante permanezca dentro de la comunidad, debido a que tendrá pocas salidas de la comunidad.

El algoritmo busca una partición M , dentro de las m particiones probables, tal que sea minimizada la longitud caminada por el caminante aleatorio. La expresión básica del algoritmo es

$$L(M) = qH(Q) + \sum_{i=1} p_i H(P_i) \quad , \quad (38)$$

donde, el primer término de la ecuación es la entropía intra módulos. Asimismo, q es la probabilidad de que un caminante aleatorio cambie de un módulo a otro, p_i es la fracción de movimientos intra comunidad que ocurre en la comunidad i más la probabilidad de salir de la comunidad. $H(Q)$ es la entropía de los clústeres y $H(P_i)$ es la entropía de los movimientos dentro del clúster.

4.5.6 Algoritmo *Leiden*

Basado en una mejora del método de Louvain (Traag et al., 2019), busca generar la optimización de la modularidad. Según sus autores, su funcionamiento está basado en tres etapas, a saber: movimiento local de los nodos, refinamiento de las particiones, creación de la red basada en la partición mejorada. Su funcionamiento es similar al del algoritmo de Louvain con la salvedad de que evita el inconveniente de crear agrupamiento los cuales puedan tener miembros desconectados, esto mediante la incorporación de un proceso de refinamiento en las soluciones.

El algoritmo comienza con una partición en la que cada nodo es una comunidad; a partir de ahí comienza a evaluarse nodo a nodo si el movimiento de cada uno de estos mejora la función de calidad; en el caso de mejorarla, dicho nodo cambia de comunidad. Este proceso es repetido solo en la primera iteración del método, ya en las restantes solo se moverán los nodos que hayan cambiado de posición; esto con la finalidad de acortar los tiempos de ejecución. En la segunda etapa, el proceso de refinamiento de la partición, los nodos son seleccionados y, aleatoriamente, se eligen comunidades formadas en el paso anterior, permitiendo la unión de los nodos con quien mejore la función de calidad. Por último, pasamos a la última etapa. Con los supernodos creados en la etapa, se vuelve a repetir el proceso de movimiento y refinamiento.

5. DETERMINACIÓN DE SECTORES APLICANDO ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE COMUNIDADES

5. DETERMINACIÓN DE SECTORES APLICANDO ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE COMUNIDADES

Partiendo de la analogía existente entre los SAAPs y los grafos, se propone usar los algoritmos de detección de comunidades para tratar de hallar el agrupamiento o separación en diferentes sectores que puedan existir dentro del SAAP. Debido a la gran diversidad de técnicas existentes y a las diferencias en cuanto a la manera en cómo realizan los agrupamientos, se decidió probar diversas técnicas basadas en la detección de comunidades en redes, ya que poseen la ventaja de agrupar en función de la información almacenada en las conexiones, lo cual resulta favorable; esto, debido a tomar en cuenta cómo la variación de los niveles de exigencia en las tuberías, ocasionada por la variación en la demanda, pudiese afectar la formación de sectores.

5.1 Red de Fossolo

La determinación de los sectores mediante la aplicación de diversos algoritmos de detección de comunidades se realizó a dos redes de prueba conocidas de la literatura. Una de las redes usadas como prueba es Fossolo (Bragalli *et al.*, 2008), la cual es la simplificación de un sector en Bologna, Italia. Esta red es de tamaño reducido, compuesta por una fuente de abastecimiento, 36 nodos de consumo y 58 tuberías. El material de dichas tuberías es polietileno y el requerimiento de presión mínima de funcionamiento es 40 mca. Dicha red ha sido empleada típicamente como prueba en procesos de optimización de diseño por Creaco y Franchini, (2014), Bi *et al.*, (2016) y Yazdi *et al.*, (2017), sin embargo a nivel de sectorización solo fue realizada una aproximación inicial por Martins *et al.*, (2017) aplicando como metodología para la formación de los sectores los mapas auto organizados. En la figura 23 se muestra el esquema de dicha red; en las tablas 2 y 3 se indica la información correspondiente a los nodos y tramos.

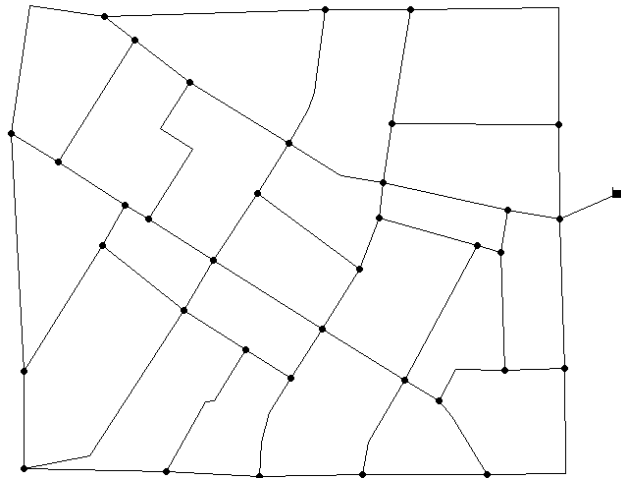


Ilustración 23. Esquema de la red de Fossolo

Tabla 2. Datos de los nodos red de la red de Fossolo

Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)
Nodo 1	65,15	0,49	Nodo 14	62,6	0,54	Nodo 27	63,9	1,42
Nodo 2	64,4	1,04	Nodo 15	63,5	1,1	Nodo 28	65,65	0,3
Nodo 3	63,35	1,02	Nodo 16	64,3	1,21	Nodo 29	64,5	0,62
Nodo 4	62,5	0,81	Nodo 17	65,5	1,27	Nodo 30	64,1	0,54
Nodo 5	61,24	0,63	Nodo 18	64,1	2,02	Nodo 31	64,4	0,9
Nodo 6	65,4	0,79	Nodo 19	62,9	1,88	Nodo 32	64,2	1,03
Nodo 7	67,9	0,26	Nodo 20	62,83	0,93	Nodo 33	64,6	0,77
Nodo 8	66,5	0,58	Nodo 21	62,8	0,96	Nodo 34	64,7	0,74
Nodo 9	66	0,54	Nodo 22	63,9	0,97	Nodo 35	65,43	1,16
Nodo 10	64,17	1,11	Nodo 23	64,2	0,86	Nodo 36	65,9	0,47
Nodo 11	63,7	1,75	Nodo 24	67,5	0,67	Deposito 37	121	
Nodo 12	62,64	0,91	Nodo 25	64,4	0,77			
Nodo 13	61,9	1,16	Nodo 26	63,4	1,69			

Tabla 3. Datos de los tramos de la red de Fossolo

Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería 1	132,76	40,8	Tubería 21	83,96	73,6	Tubería 41	203,83	40,8
Tubería 2	374,68	16	Tubería 22	49,82	102,2	Tubería 42	248,05	16
Tubería 3	119,74	16	Tubería 23	78,5	90	Tubería 43	65,19	32,6
Tubería 4	312,72	16	Tubería 24	99,27	73,6	Tubería 44	210,09	32,6
Tubería 5	289,09	26	Tubería 25	82,29	61,4	Tubería 45	147,57	40,8
Tubería 6	336,33	16	Tubería 26	147,49	32,6	Tubería 46	103,8	16
Tubería 7	135,81	16	Tubería 27	197,32	40,8	Tubería 47	210,95	32,6
Tubería 8	201,26	16	Tubería 28	83,3	102,2	Tubería 48	75,08	51,4
Tubería 9	132,53	16	Tubería 29	113,8	90	Tubería 49	180,29	16
Tubería 10	144,66	16	Tubería 30	80,82	61,4	Tubería 50	149,05	16
Tubería 11	175,72	20,4	Tubería 31	340,97	26	Tubería 51	215,05	32,6
Tubería 12	112,17	32,6	Tubería 32	77,39	16	Tubería 52	144,44	16
Tubería 13	210,74	51,4	Tubería 33	112,37	16	Tubería 53	34,74	51,4
Tubería 14	75,41	204,6	Tubería 34	37,34	40,8	Tubería 54	59,93	73,6
Tubería 15	181,42	184	Tubería 35	108,85	51,4	Tubería 55	165,67	32,6
Tubería 16	146,96	147,2	Tubería 36	182,82	16	Tubería 56	119,97	20,4
Tubería 17	162,69	90	Tubería 37	136,02	16	Tubería 57	83,17	32,6
Tubería 18	99,64	73,6	Tubería 38	56,7	16	Tubería 58	1	229,2
Tubería 19	52,98	40,8	Tubería 39	124,08	16			
Tubería 20	162,97	40,8	Tubería 40	234,6	16			

5.2 Detección de sectores con información en las aristas

Como se planteó anteriormente, la razón para la escogencia de los métodos de detección de comunidades, de debe a que implican dentro del proceso de formación de clústeres, información referente a los tramos. Esto es ideal, ya que al solo asumirse la información contenida en los nodos (cota, demanda, presión o cualquiera otra), tendremos altas probabilidades de generar sectores que no estén conectados físicamente. De hecho, aquí radica la una fortaleza de los métodos de detección de comunidades, ya que se puede incorporar la información de los tramos, lo cual garantizará comunidades que estén realmente conectadas.

Desde el punto de vista de información en los tramos, a lo cual se le puede denominar pesos, la escogencia de este pudiera ser importante, ya que para cada uno de ellos se podrá obtener diferentes formas de agrupamiento (Di Nardo et al., 2017).

Se trabajó con cuatro tipos de pesos en las aristas, cada uno de ellos con diferentes capacidades de trabajo, esto con la finalidad de valorar si hay incidencia directa en la conformación de los sectores.

En la figura 24, se muestra el pseudo código con el procedimiento para la determinación de los sectores, en función del peso que se defina en las aristas.

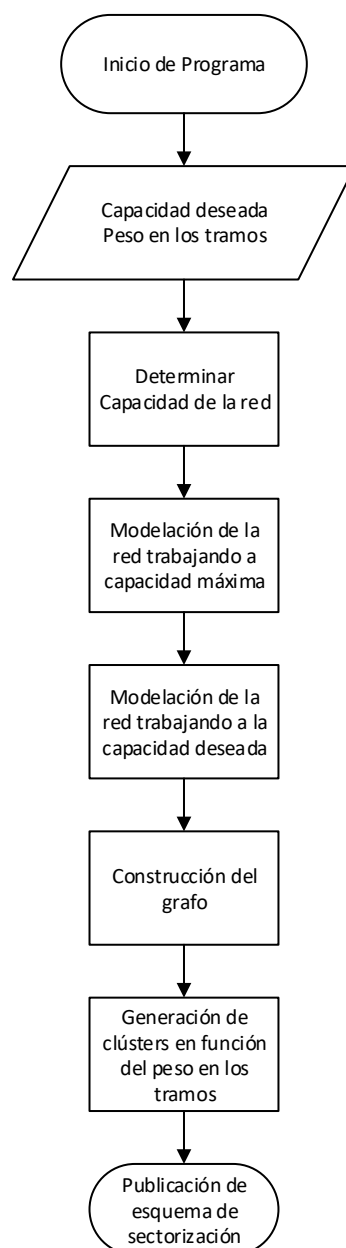


Ilustración 24. Pseudo código para la determinación de los sectores en la red de Fossolo

Para cada uno de los pesos que se usó en la modelación, se establecieron también diferentes capacidades a las cuales pudiese estar trabajando la red, esto con la finalidad de detectar si la capacidad a la cual trabaja la red afecta la configuración de los sectores. En el caso de la red de Fossolo, se establecieron arbitrariamente capacidades de 80%, 90%, 100%, 110%, 120% y 130% de su capacidad máxima.

5.2.1 Peso 1: Caudal circulante con red funcionando a capacidad deseada

Este peso aplicado en cada uno de los métodos de detección consiste en establecer en las aristas, el caudal circulante, como valoración dentro de los algoritmos de sectorización. Así pues, con cada capacidad deseada, habrá un caudal circulante diferente.

En la tabla 4, se puede apreciar los sectores que son detectados por los diferentes algoritmos de detección de comunidades, así como la modularidad final resultante, para la red trabajando a un 80, 90 y 100% de su capacidad máxima.

Tabla 4. Número de sectores y modularidad para peso 1, con capacidades de trabajo entre 80% y 100%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 80%		Capacidad a 90%		Capacidad a 100%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
Algoritmo <i>fast greedy</i>	6	0,41	6	0,41	6	0,41
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	7	0,36	7	0,36	7	0,36
Algoritmo <i>Louvain</i>	5	0,43	5	0,43	5	0,43
Algoritmo <i>walktrap</i>	7	0,37	7	0,37	7	0,37
Algoritmo <i>infomap</i>	6	0,35	6	0,35	6	0,35
Algoritmo <i>Leiden</i>	4	0,42	4	0,42	5	0,43

Asimismo, en la tabla 5, se muestra la misma descripción de la tabla anterior, pero con la red trabajando a 110%, 120% y 130% de su capacidad máxima de trabajo.

Tabla 5. Número de sectores y modularidad para peso 1, con capacidades de trabajo entre 110% y 130%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 110%		Capacidad a 120%		Capacidad a 130%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
<i>Algoritmo fast greedy</i>	6	0,41	6	0,41	6	0,41
<i>Algoritmo edge betweenness</i>	7	0,36	4	0,32	7	0,36
<i>Algoritmo Louvain</i>	5	0,43	5	0,43	5	0,43
<i>Algoritmo walktrap</i>	7	0,37	7	0,37	7	0,37
<i>Algoritmo infomap</i>	6	0,35	6	0,35	6	0,35
<i>Algoritmo Leiden</i>	5	0,41	5	0,42	5	0,42

De los resultados obtenidos en las tablas, se puede valorar que no existe diferencia entre los sectores de la red operando a diversas capacidades, es decir, la configuración de los sectores obtenidos, no varía significativamente para este peso establecido.

En las figuras siguientes, se muestra la configuración de sectores obtenida por cada algoritmo implementado y para las varias capacidades de trabajo estudiadas, donde se puede reafirmar, la idea expresada en el párrafo anterior.

Asimismo, desde el punto de vista de selección de una opción, a priori no se puede elegir esta en función de la modularidad, ya que la magnitud de esta no indica directamente la mejor solución (Kolaczyk y Csárdi, 2014).

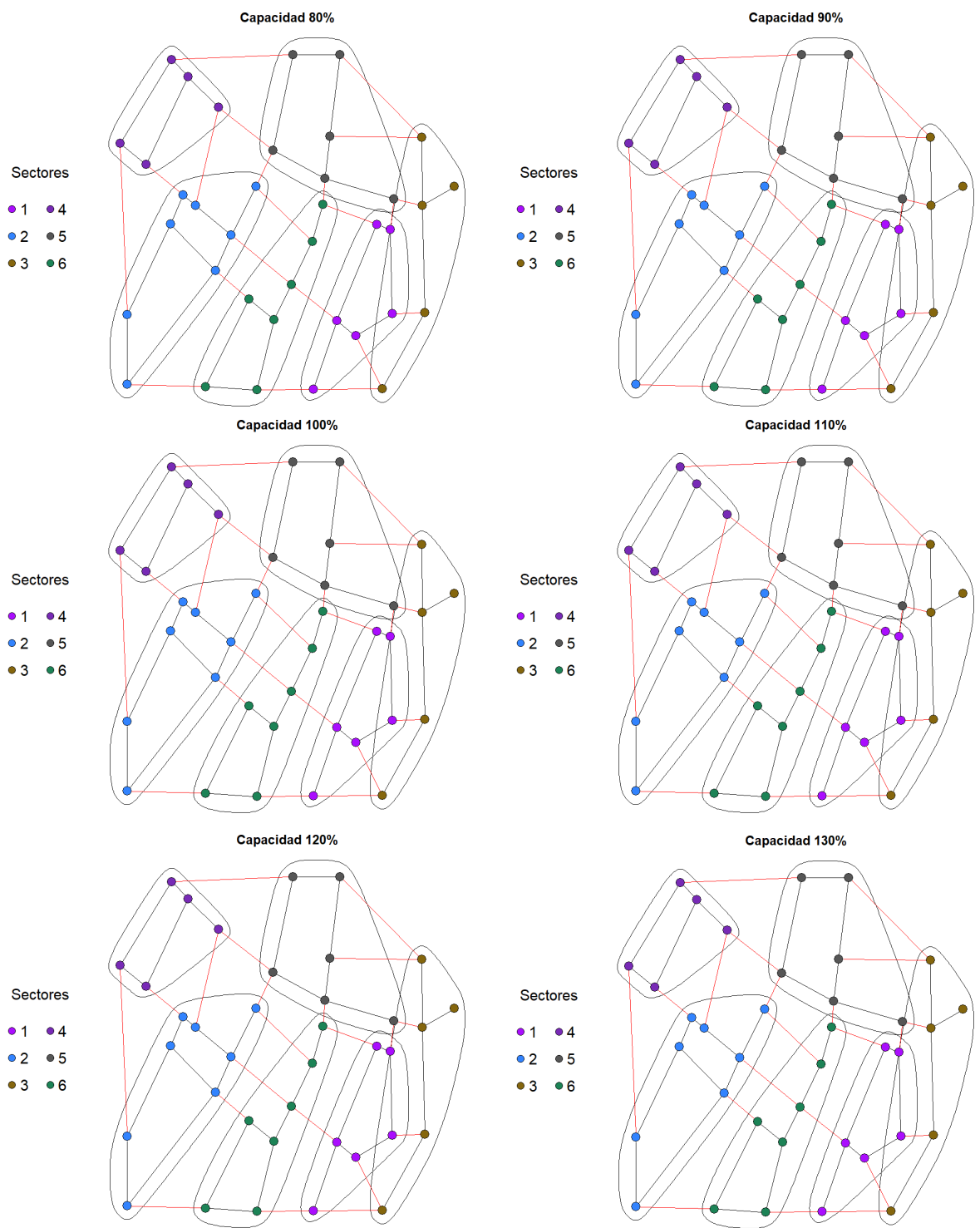


Ilustración 25. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo fast greedy con peso 1 en las aristas

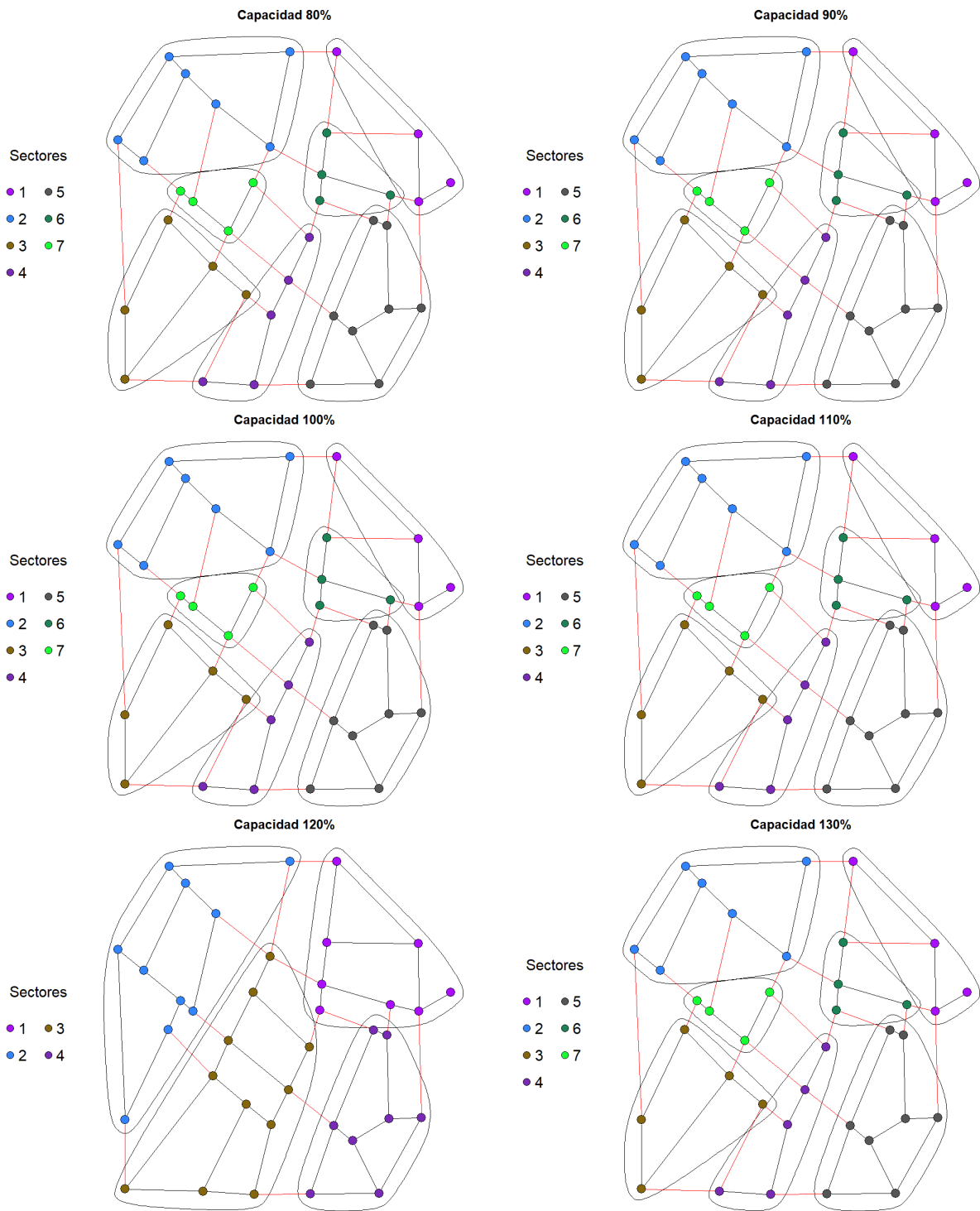


Ilustración 26. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo edge betweenness con peso 1 en las aristas

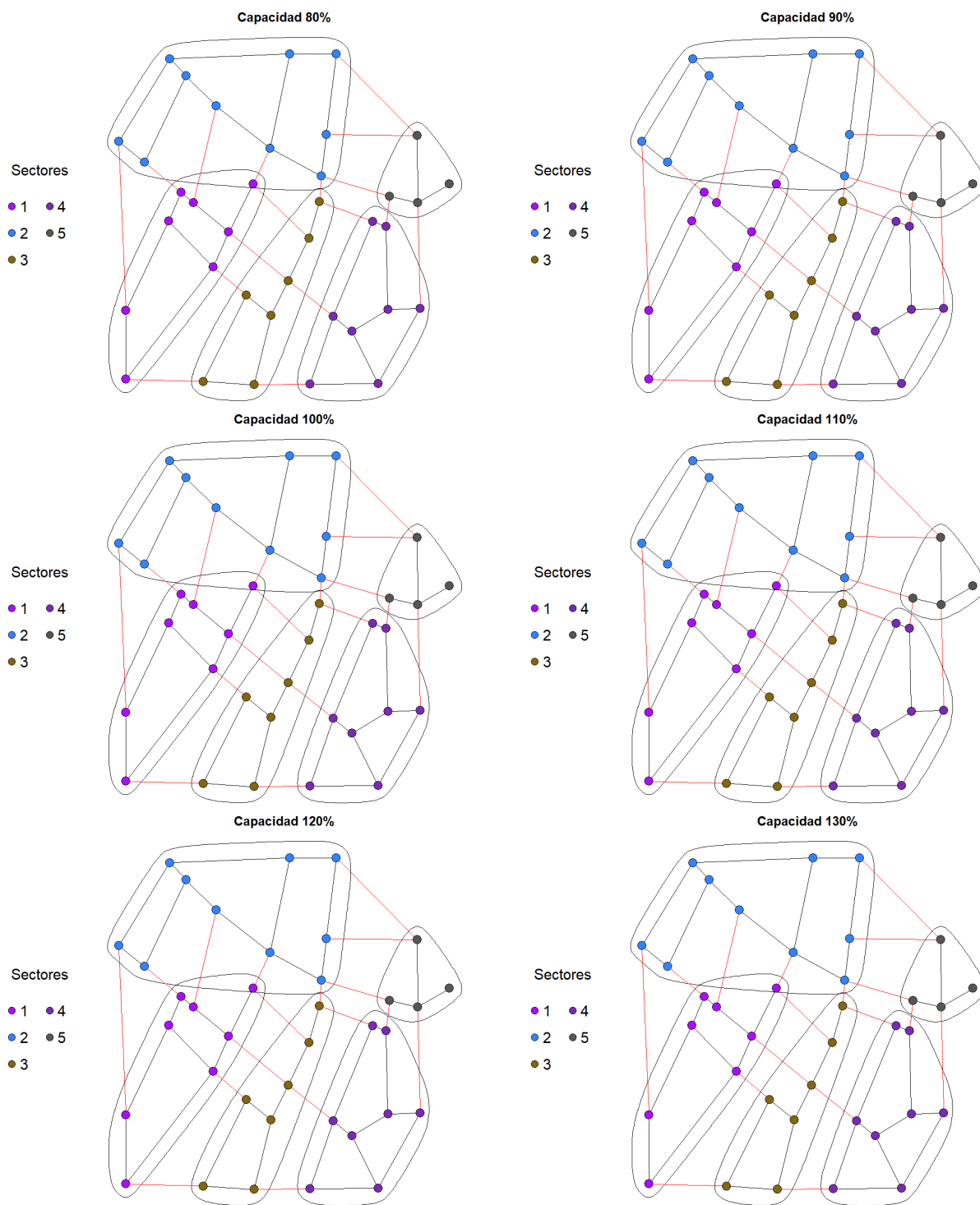


Ilustración 27. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo Louvain con peso 1 en las aristas

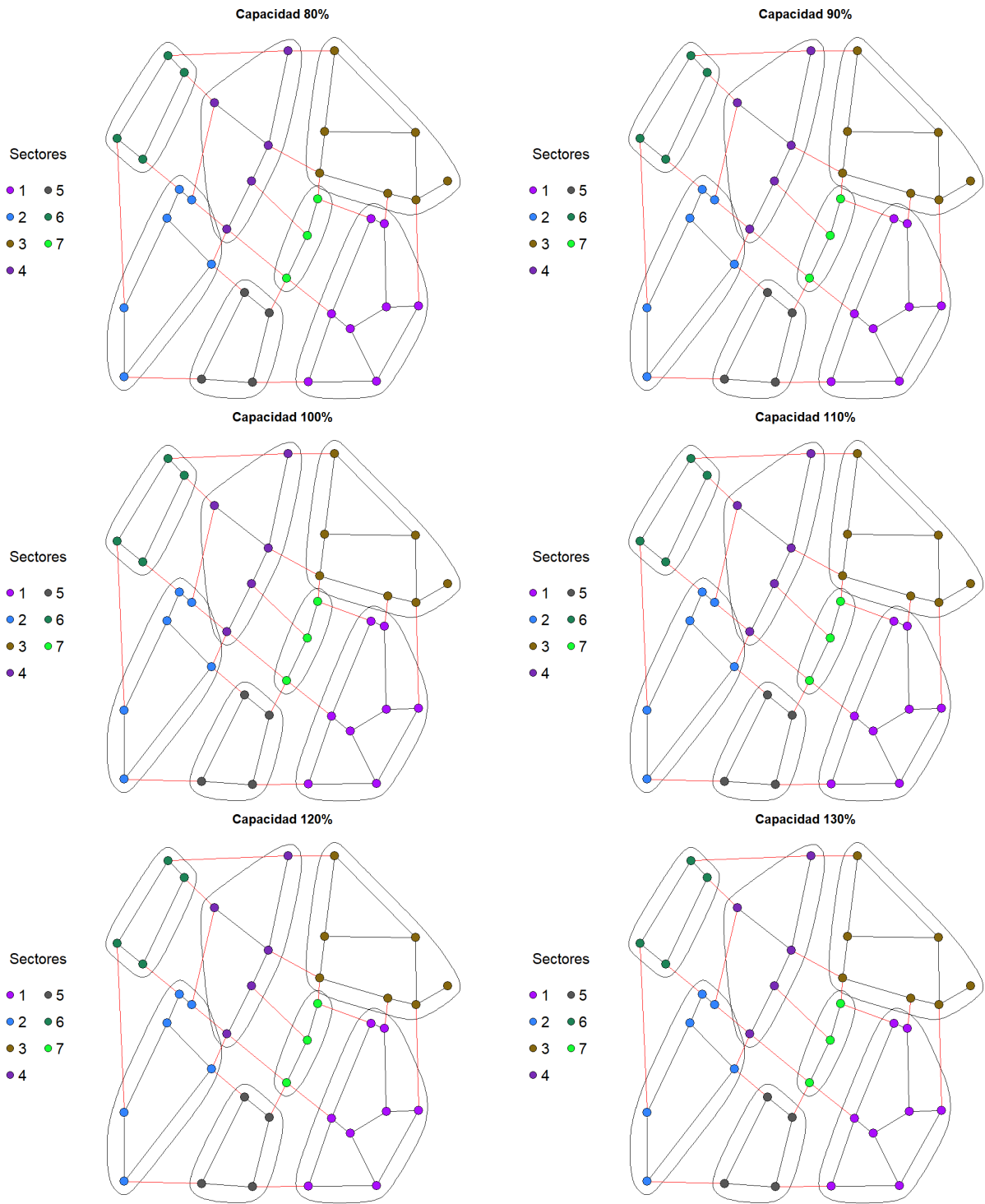


Ilustración 28. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo walktrap con peso 1 en las aristas

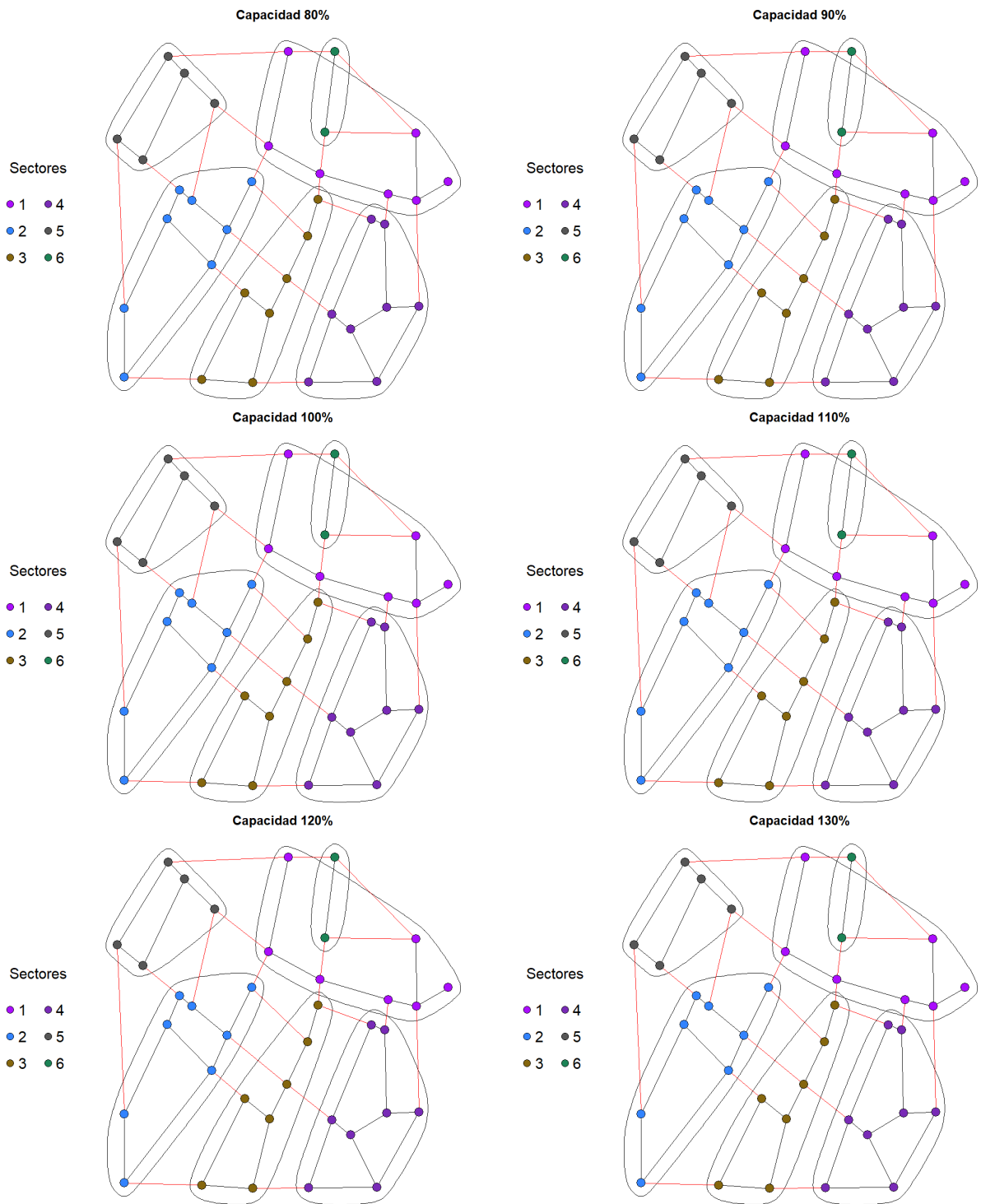


Ilustración 29. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo infomap con peso 1 en las aristas

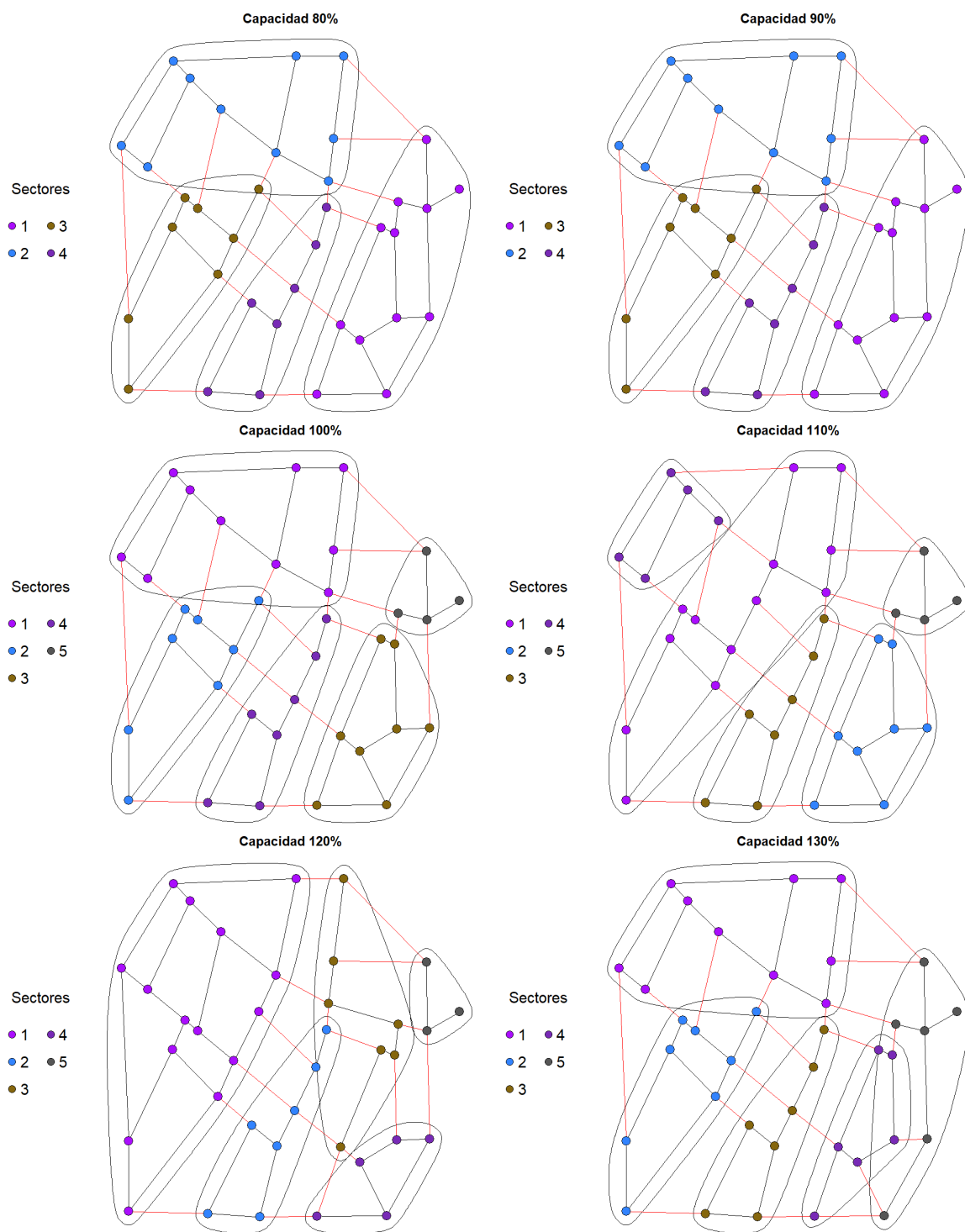


Ilustración 30. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Leiden con peso 1 en las aristas

5.2.2 Peso 2: Energía disipada con red funcionando a capacidad deseada

Este peso ya fue planteado por Di Nardo (Di Nardo et al., 2014a, 2013b) en sus trabajos y más recientemente tomado en consideración por Zhang (Zhang et al., 2019). Posee la ventaja de describir el comportamiento de la tubería en función del flujo circulante, por lo cual, este cambiará en función de la capacidad de trabajo a la cual esté operando la red.

Di Nardo et al., (2014a, 2014b) plantea el uso de la energía disipada, que está definida según la ecuación

$$Peso\ 2 = q_{ij} \Delta h_{ij} , \quad (39)$$

donde q_{ij} y Δh_{ij} son respectivamente, el caudal que circula en el tramo y la diferencia de altura piezométrica entre el inicio y fin del tramo.

Se puede resumir en la tabla 6 y 7 la modularidad y la cantidad de sectores que se obtienen para cada algoritmo con el uso de ese peso en las aristas de la red.

Tabla 6. Número de sectores y modularidad para peso 2, con capacidades de trabajo entre 80% y 100%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 80%		Capacidad a 90%		Capacidad a 100%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
Algoritmo <i>fast greedy</i>	7	0,64	7	0,64	7	0,64
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	4	0,44	4	0,44	4	0,44
Algoritmo <i>Louvain</i>	6	0,63	6	0,63	6	0,63
Algoritmo <i>walktrap</i>	11	0,62	11	0,62	11	0,62
Algoritmo <i>infomap</i>	10	0,62	10	0,62	10	0,62
Algoritmo <i>Leiden</i>	7	0,64	7	0,64	7	0,64

Tabla 7. Número de sectores y modularidad para peso 2, con capacidades de trabajo entre 110% y 130%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 110%		Capacidad a 120%		Capacidad a 130%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
<i>Algoritmo fast greedy</i>	7	0,64	7	0,63	7	0,63
<i>Algoritmo edge betweenness</i>	4	0,44	4	0,44	4	0,44
<i>Algoritmo Louvain</i>	6	0,63	6	0,63	6	0,63
<i>Algoritmo walktrap</i>	11	0,62	11	0,62	11	0,62
<i>Algoritmo infomap</i>	10	0,62	10	0,62	10	0,62
<i>Algoritmo Leiden</i>	7	0,64	7	0,63	7	0,63

De acuerdo con los resultados obtenidos, no se aprecian diferencias entre los sectores formados para cada una de las capacidades de trabajo establecidas, para la red en cuestión estudiada.

En la serie de imágenes 31 a 36, puede constatarse la aseveración anterior; asimismo, se aprecia que de acuerdo con cada algoritmo de sectorización variará el número de sectores formados, pero manteniéndose este constante para cada método.

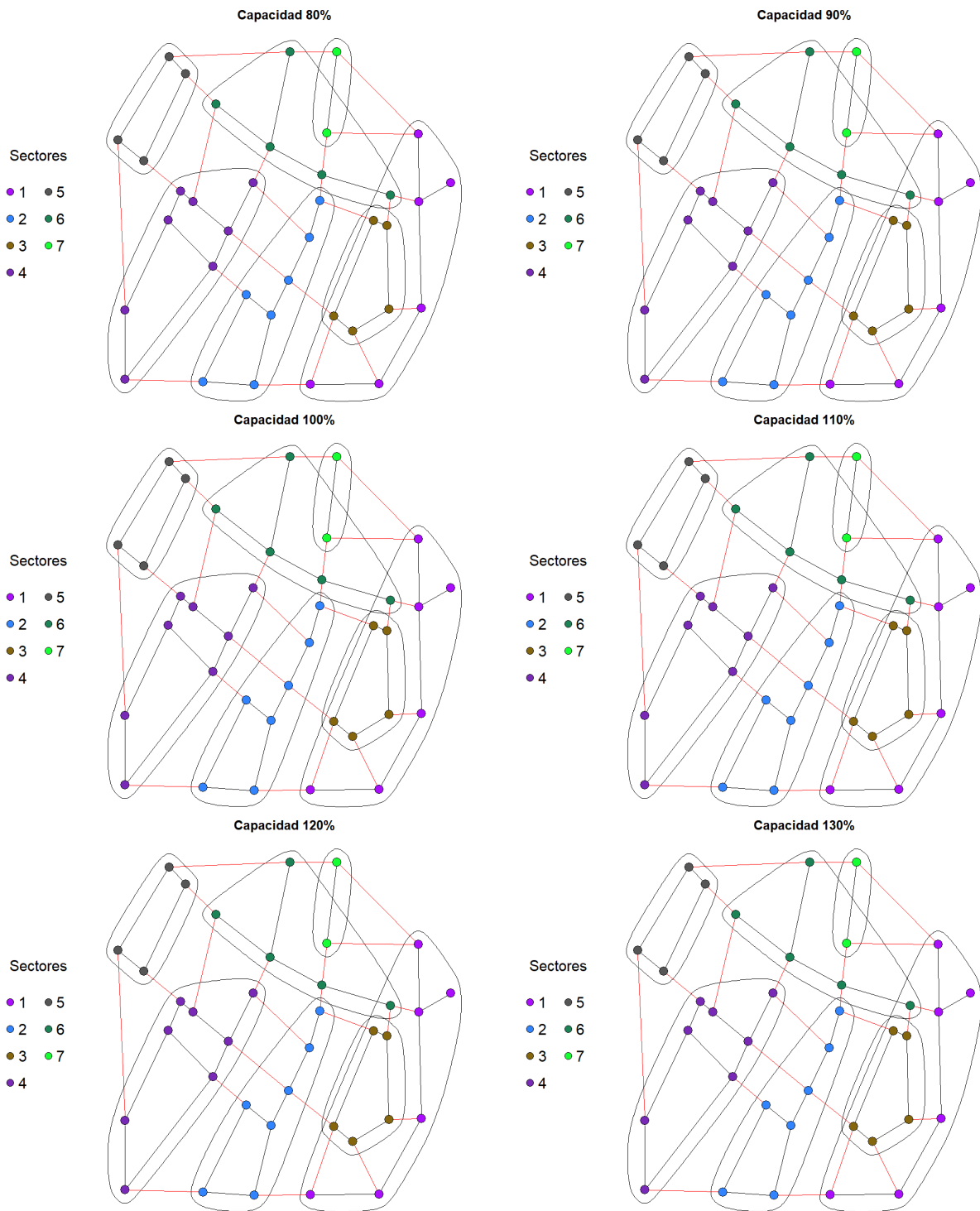


Ilustración 31. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo fast greedy con peso 2 en las aristas

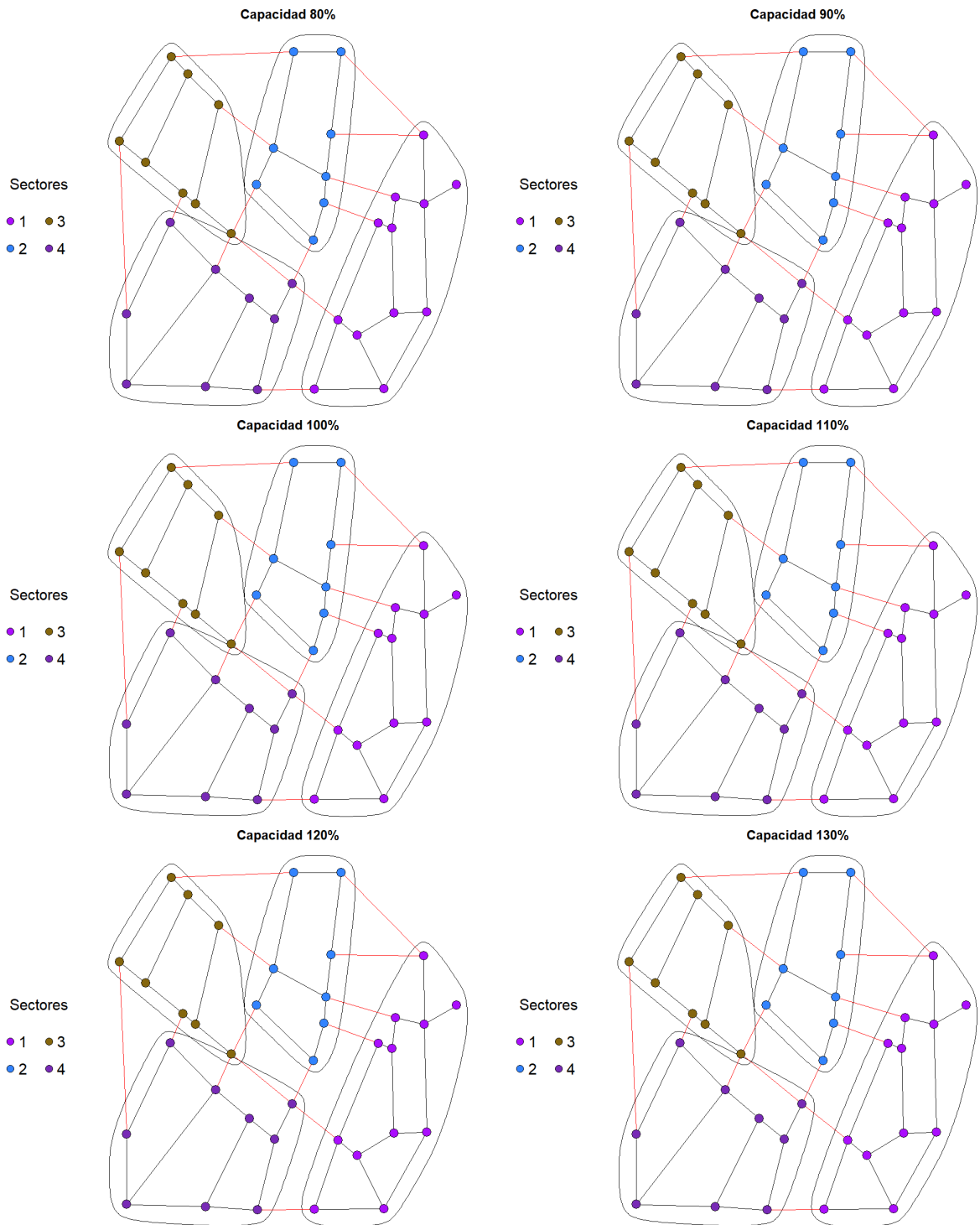


Ilustración 32. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo edge betweenness con peso 2 en las aristas

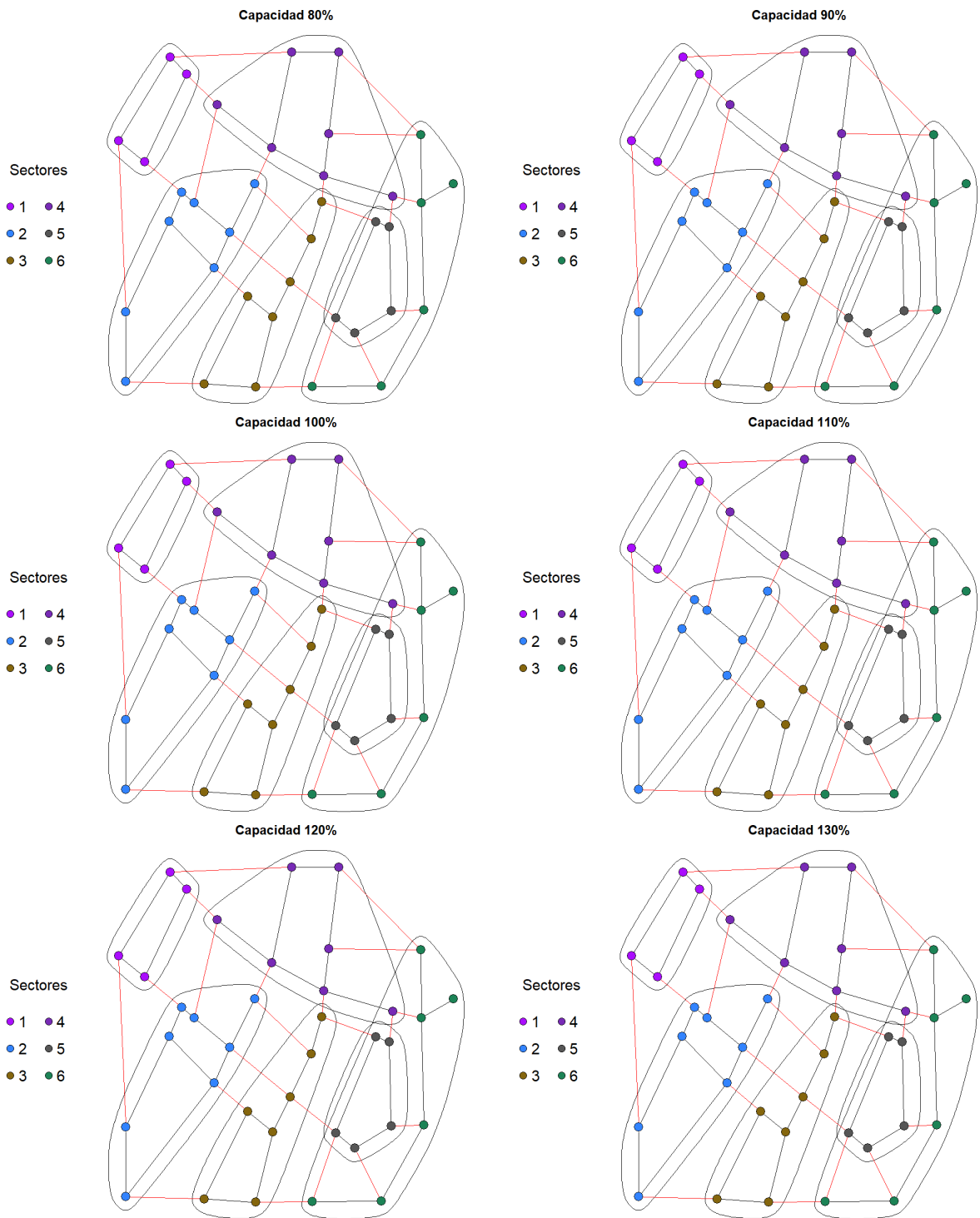


Ilustración 33. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Louvain con peso 2 en las aristas

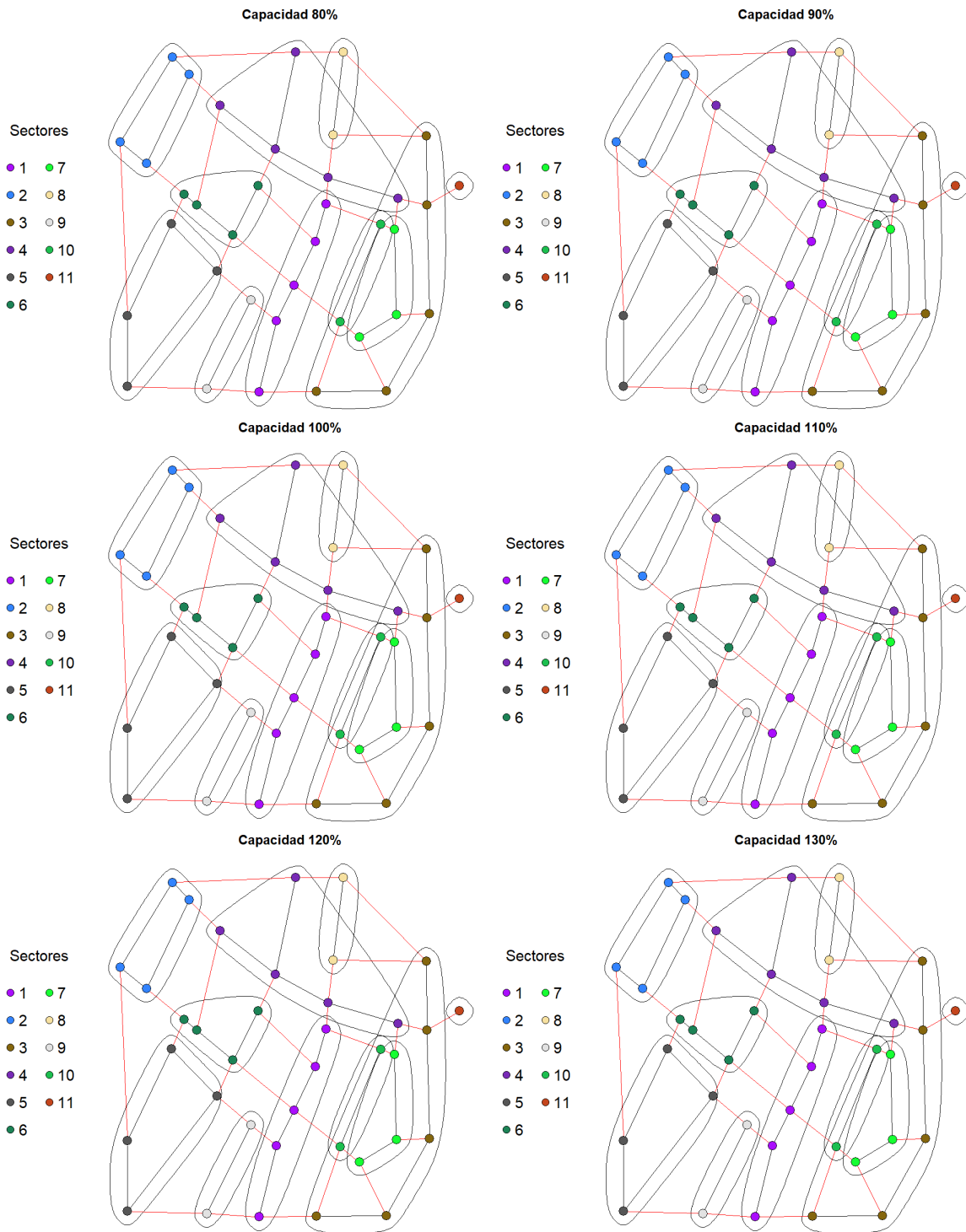


Ilustración 34. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo walktrap con peso 2 en las aristas

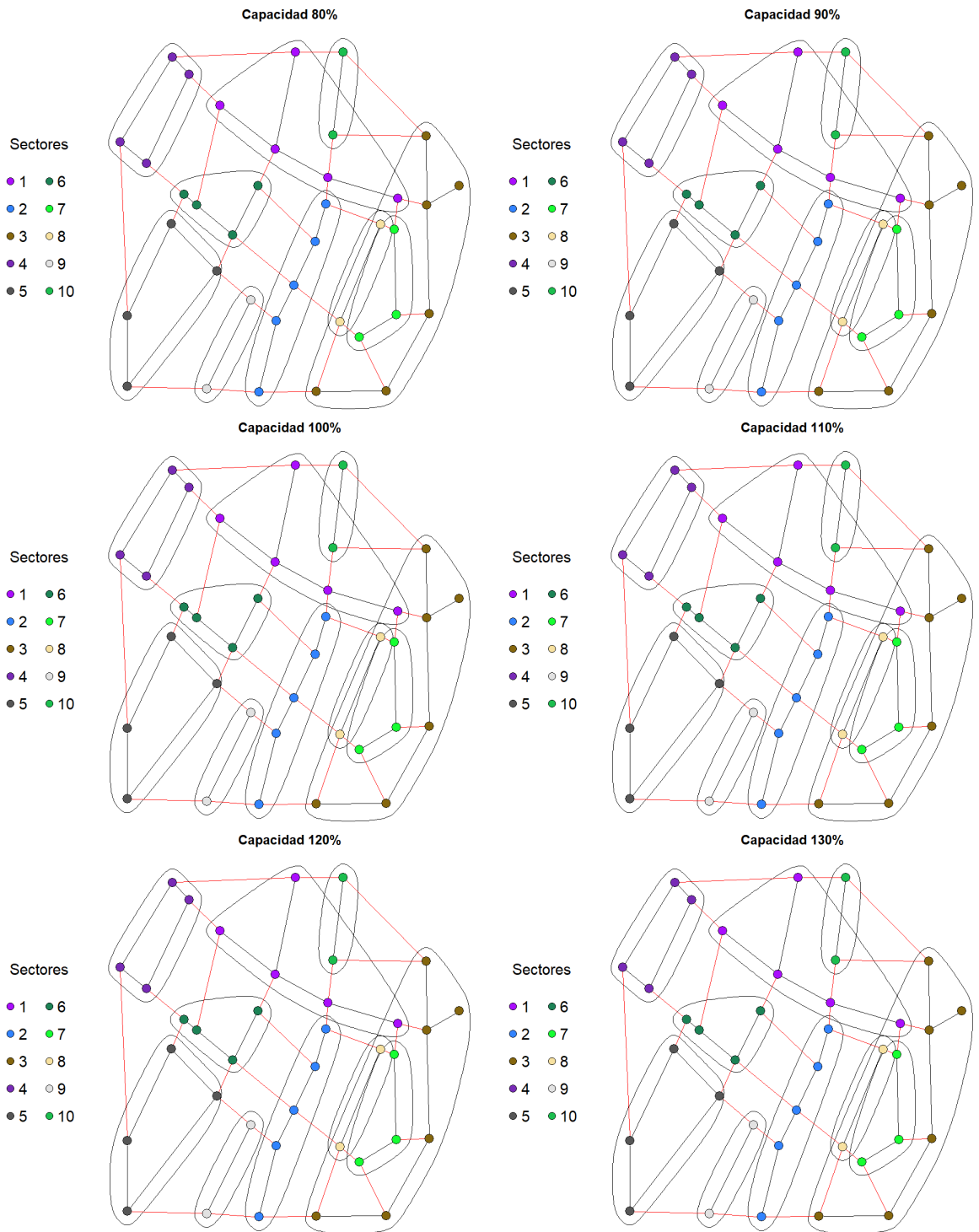


Ilustración 35. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo infomap con peso 2 en las aristas

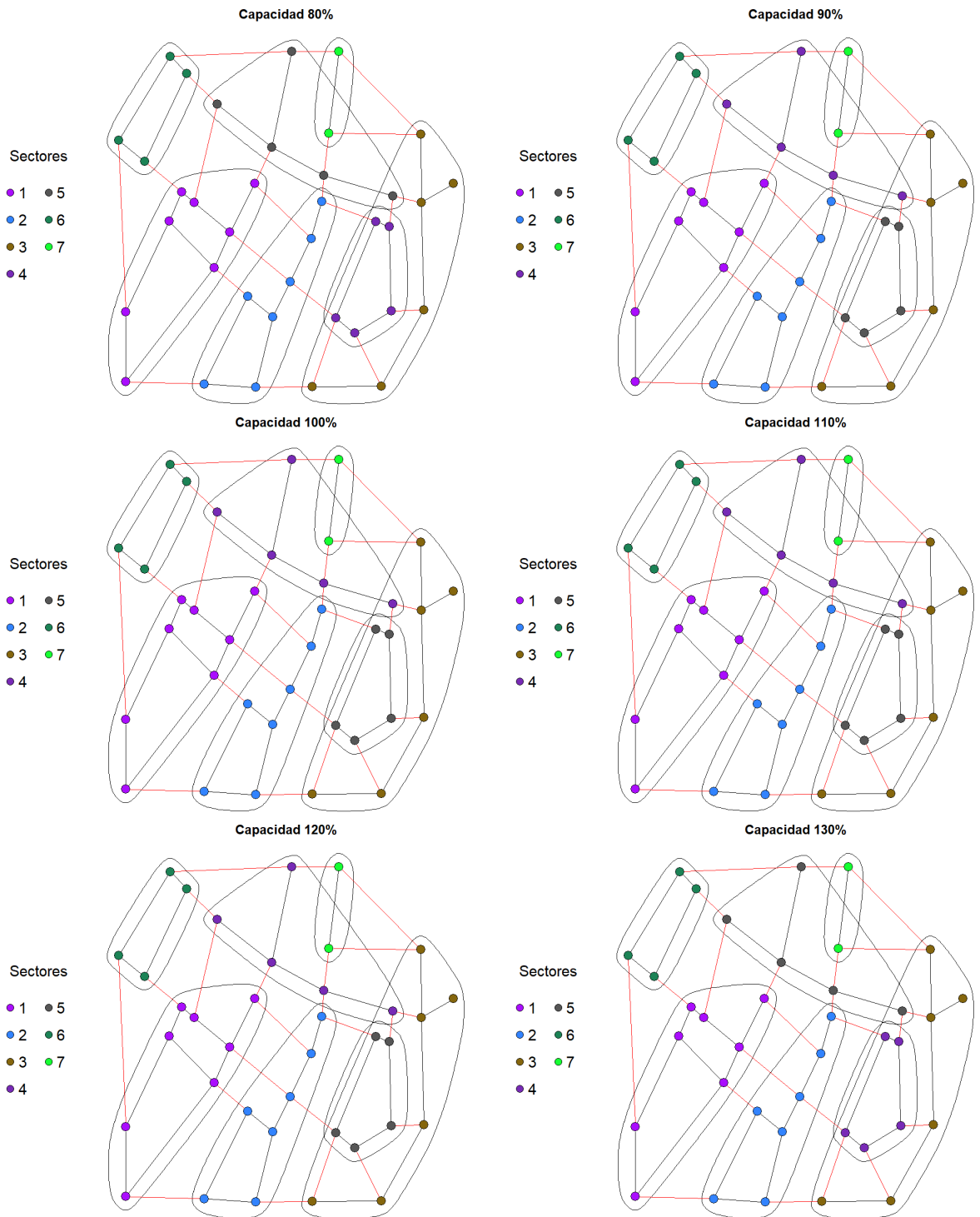


Ilustración 36. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Leiden con peso 2 en las aristas

5.2.3 Peso 3: Relación de caudal circulante y caudal circulante a capacidad máxima teórica

Como medida de peso alternativa se plantea el uso de la relación del caudal circulante con el caudal a capacidad máxima teórica de la red, el cual quedaría definido según se muestra en la ecuación 40.

$$Peso\ 3 = \frac{q_{ij}}{q_{ijm\acute{a}x}} \quad (40)$$

Aquí q_{ij} y $q_{ijm\acute{a}x}$ son respectivamente, el caudal que circula en el tramo y el caudal máximo teórico que circulará en el tramo cuando la red trabaje a su máxima capacidad.

Con este tipo de peso, se busca generar sectores que posean iguales características de comportamiento bajo condiciones extremas de operación.

Se puede resumir en la tabla 8 y 9 la modularidad y la cantidad de sectores que se obtienen para cada algoritmo con el uso de ese peso en las aristas de la red.

Tabla 8. Número de sectores y modularidad para peso 3, con capacidades de trabajo entre 80% y 100%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 80%		Capacidad a 90%		Capacidad a 100%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
Algoritmo <i>fast greedy</i>	5	0,51	5	0,51	5	0,53
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	6	0,53	6	0,51	6	0,52
Algoritmo <i>Louvain</i>	5	0,52	5	0,49	5	0,53
Algoritmo <i>walktrap</i>	5	0,53	6	0,51	6	0,51
Algoritmo <i>infomap</i>	6	0,54	5	0,56	5	0,55
Algoritmo <i>Leiden</i>	4	0,53	4	0,54	4	0,54

Tabla 9. Número de sectores y modularidad para peso 3, con capacidades de trabajo entre 110% y 130%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 110%		Capacidad a 120%		Capacidad a 130%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
<i>Algoritmo fast greedy</i>	4	0,53	5	0,51	5	0,51
<i>Algoritmo edge betweenness</i>	7	0,51	4	0,51	5	0,54
<i>Algoritmo Louvain</i>	5	0,54	5	0,53	6	0,52
<i>Algoritmo walktrap</i>	6	0,51	5	0,53	5	0,54
<i>Algoritmo infomap</i>	5	0,55	5	0,55	5	0,55
<i>Algoritmo Leiden</i>	4	0,54	4	0,52	4	0,53

Al igual que en los casos anteriores, no se presentan diferencias significativas en la conformación de los sectores para cada uno de los metros, tal y como se muestra en la serie de imágenes siguientes.

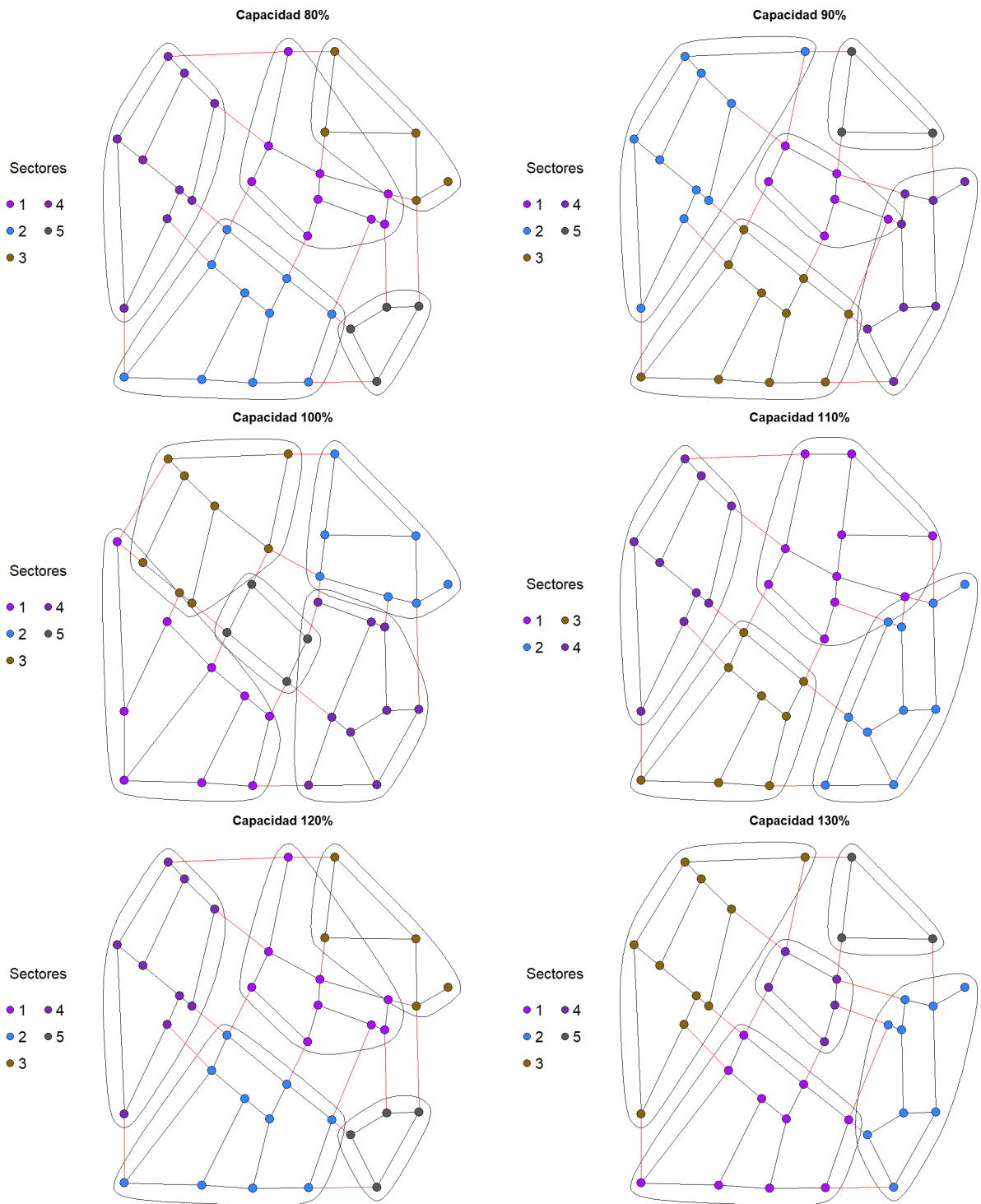


Ilustración 37. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo fast greedy con peso 3 en las aristas

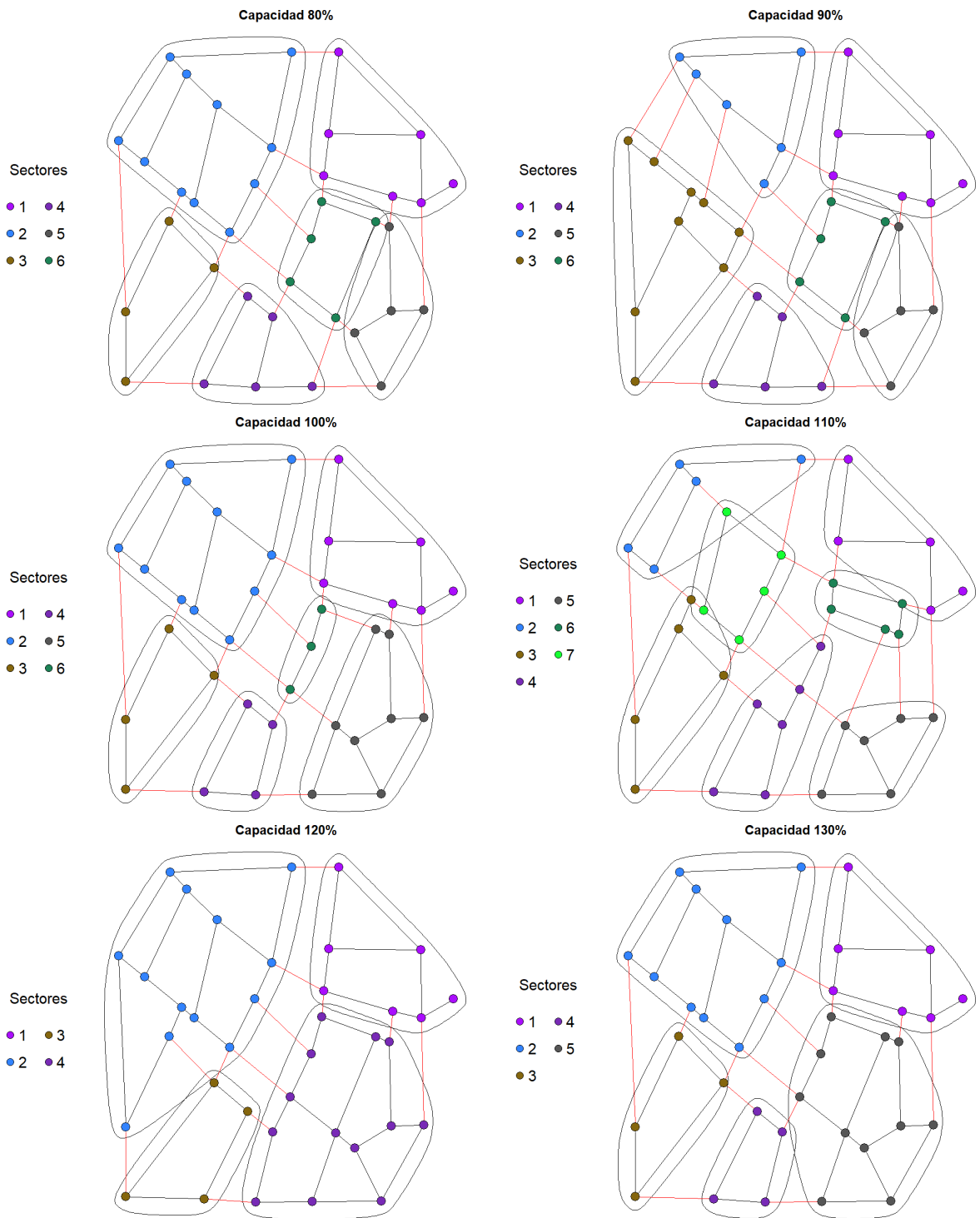


Ilustración 38. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo edge betweenness con peso 3 en las aristas

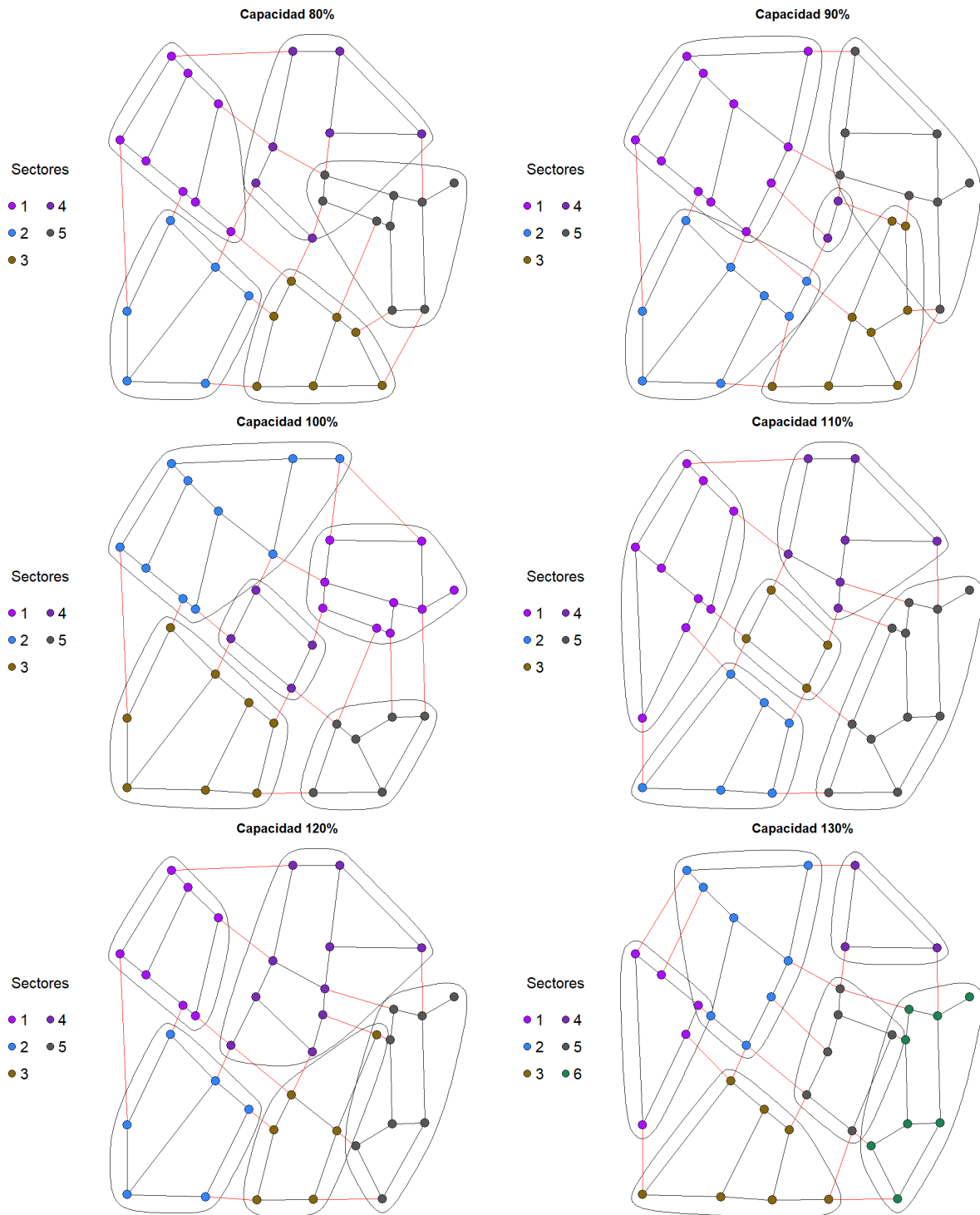


Ilustración 39. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Louvain con peso 3 en las aristas

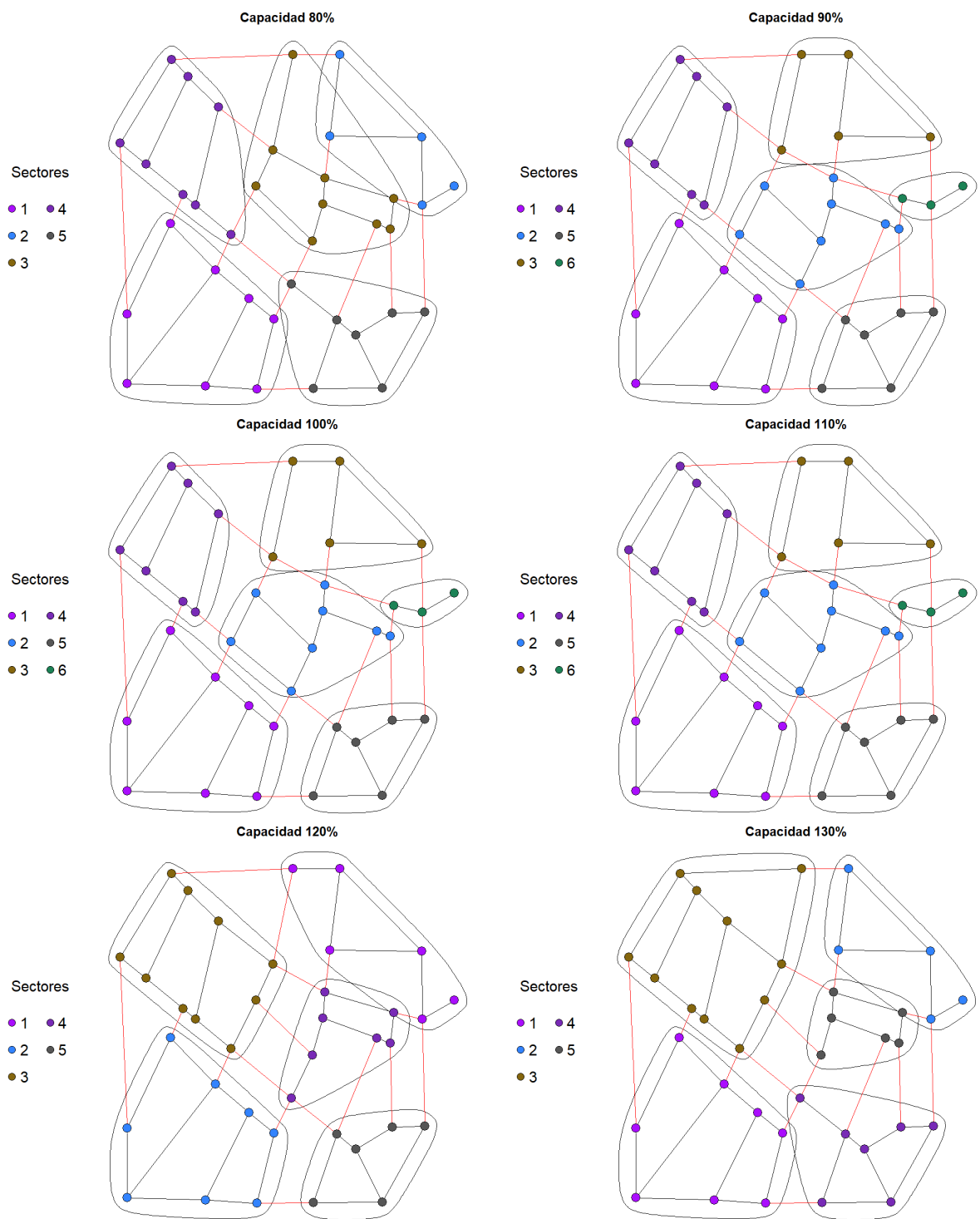


Ilustración 40. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo walktrap con peso 3 en las aristas

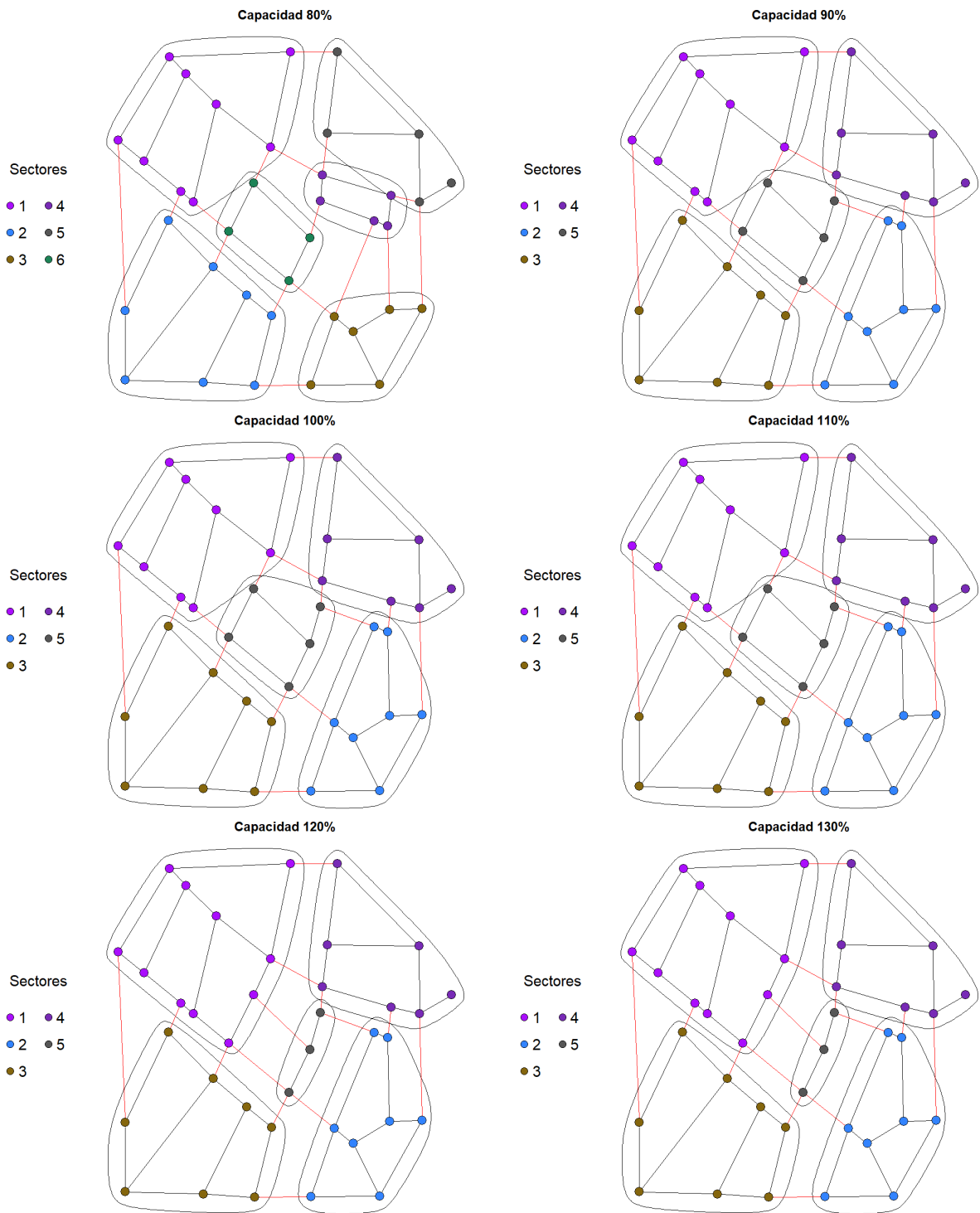


Ilustración 41. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo infomap con peso 3 en las aristas

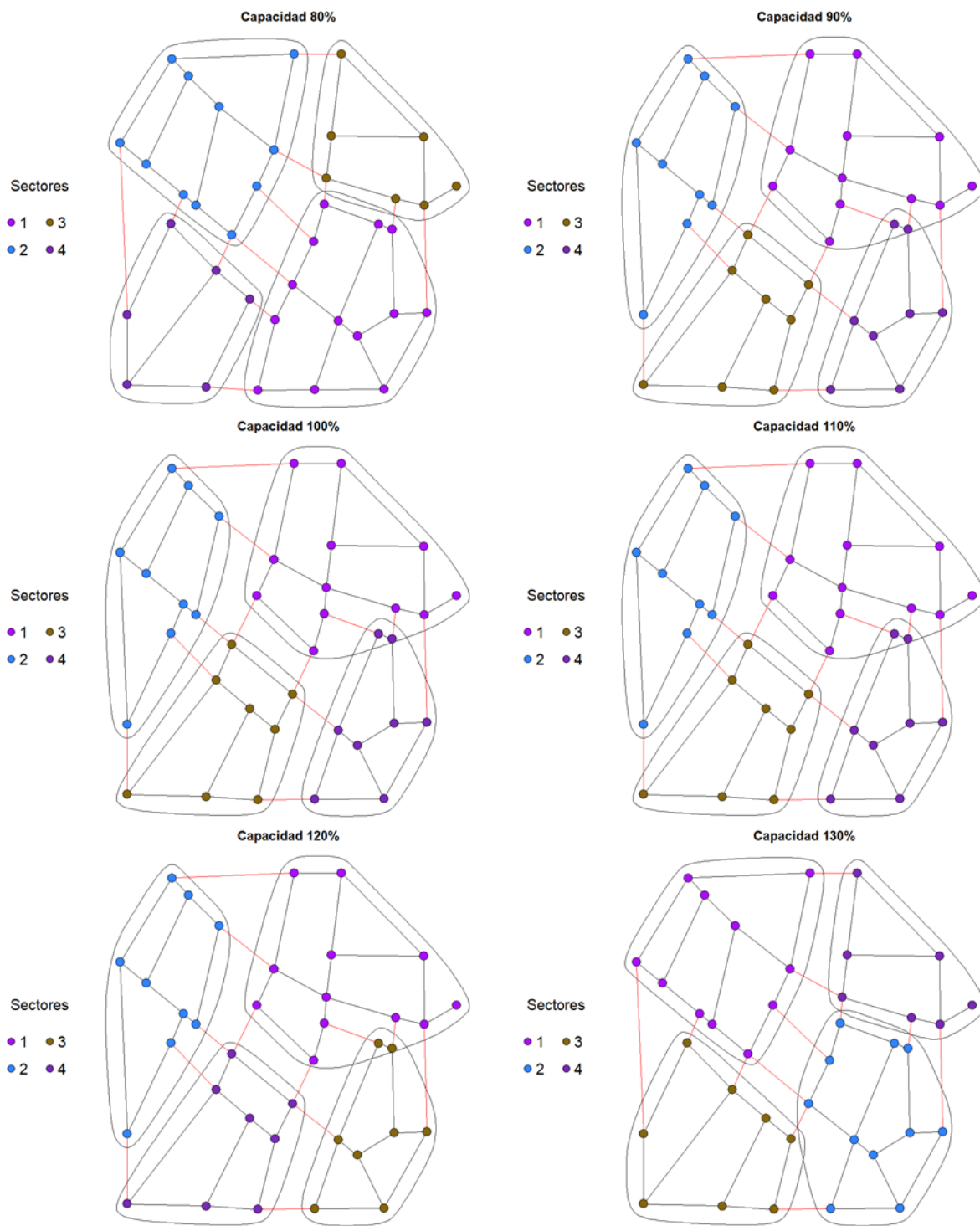


Ilustración 42. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Leiden con peso 3 en las aristas

5.2.4 Peso 4: Relación de la energía disipada trabajando a la capacidad deseada entre el inverso de la energía disipada con la red trabajando a capacidad máxima

Se propone también el uso de la relación de las energías disipadas en la red cuando esta trabaja a una capacidad deseada versus si trabajase a capacidad máxima. Este peso queda definido según lo mostrado en la ecuación 41.

$$Peso\ 4 = \frac{q_{ij}\Delta h_{ij}}{q_{ijm\acute{a}x}\Delta h_{ijm\acute{a}x}} \quad (41)$$

Aquí q_{ij} y Δh_{ij} son, respectivamente, el caudal que circula en el tramo y la diferencia de altura piezométrica entre el inicio y fin del tramo; y $q_{ijm\acute{a}x}$ y $\Delta h_{ijm\acute{a}x}$ son, respectivamente, el caudal que circula en el tramo a capacidad máxima y la diferencia de altura piezométrica entre el inicio y fin del tramo con la red trabajando a capacidad máxima.

Se puede resumir en las tablas 10 y 11 la modularidad y la cantidad de sectores que se obtienen para cada algoritmo con el uso de ese peso en las aristas de la red.

Tabla 10. Número de sectores y modularidad para peso 4, con capacidades de trabajo entre 80% y 100%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 80%		Capacidad a 90%		Capacidad a 100%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
Algoritmo <i>fast greedy</i>	5	0,51	6	0,47	5	0,53
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	6	0,53	6	0,51	6	0,52
Algoritmo <i>Louvain</i>	5	0,54	5	0,52	5	0,53
Algoritmo <i>walktrap</i>	5	0,53	6	0,51	6	0,51
Algoritmo <i>infomap</i>	6	0,54	5	0,55	5	0,55
Algoritmo <i>Leiden</i>	4	0,53	4	0,53	4	0,52

Tabla 11. Número de sectores y modularidad para peso 4, con capacidades de trabajo entre 110% y 130%

Algoritmo de Sectorización	Capacidad a 110%		Capacidad a 120%		Capacidad a 130%	
	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad	No. de sectores	Modularidad
<i>Algoritmo fast greedy</i>	5	0,53	5	0,51	5	0,50
<i>Algoritmo edge betweenness</i>	7	0,51	6	0,51	5	0,54
<i>Algoritmo Louvain</i>	5	0,54	6	0,51	6	0,50
<i>Algoritmo walktrap</i>	6	0,50	5	0,54	5	0,53
<i>Algoritmo infomap</i>	5	0,55	5	0,55	5	0,55
<i>Algoritmo Leiden</i>	4	0,54	4	0,53	4	0,55

En la serie de imágenes siguientes se muestran la configuración de los sectores obtenidos, donde se mantiene la tendencia de las series de imágenes anteriores.

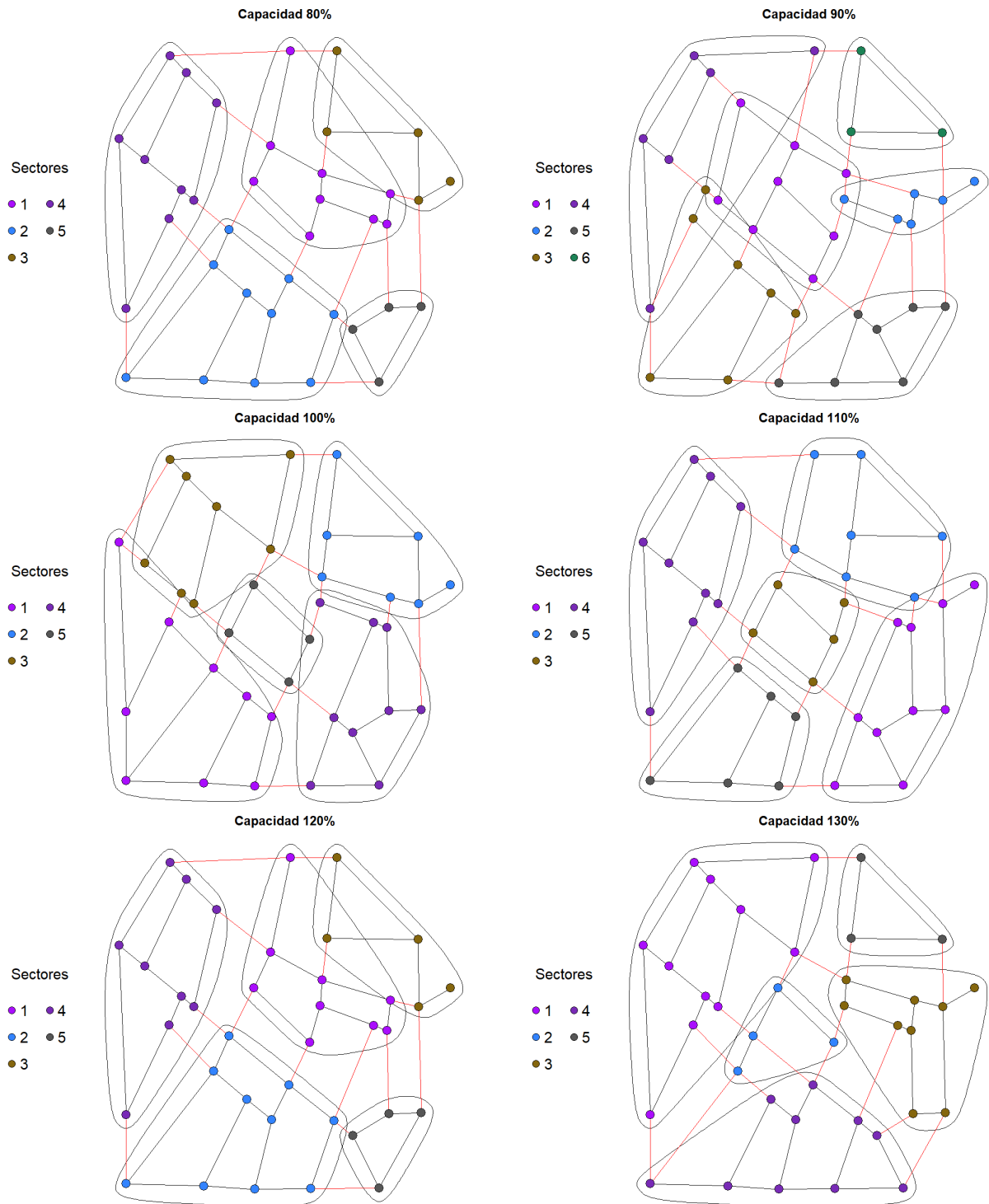


Ilustración 43. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo fast greedy con peso 4 en las aristas

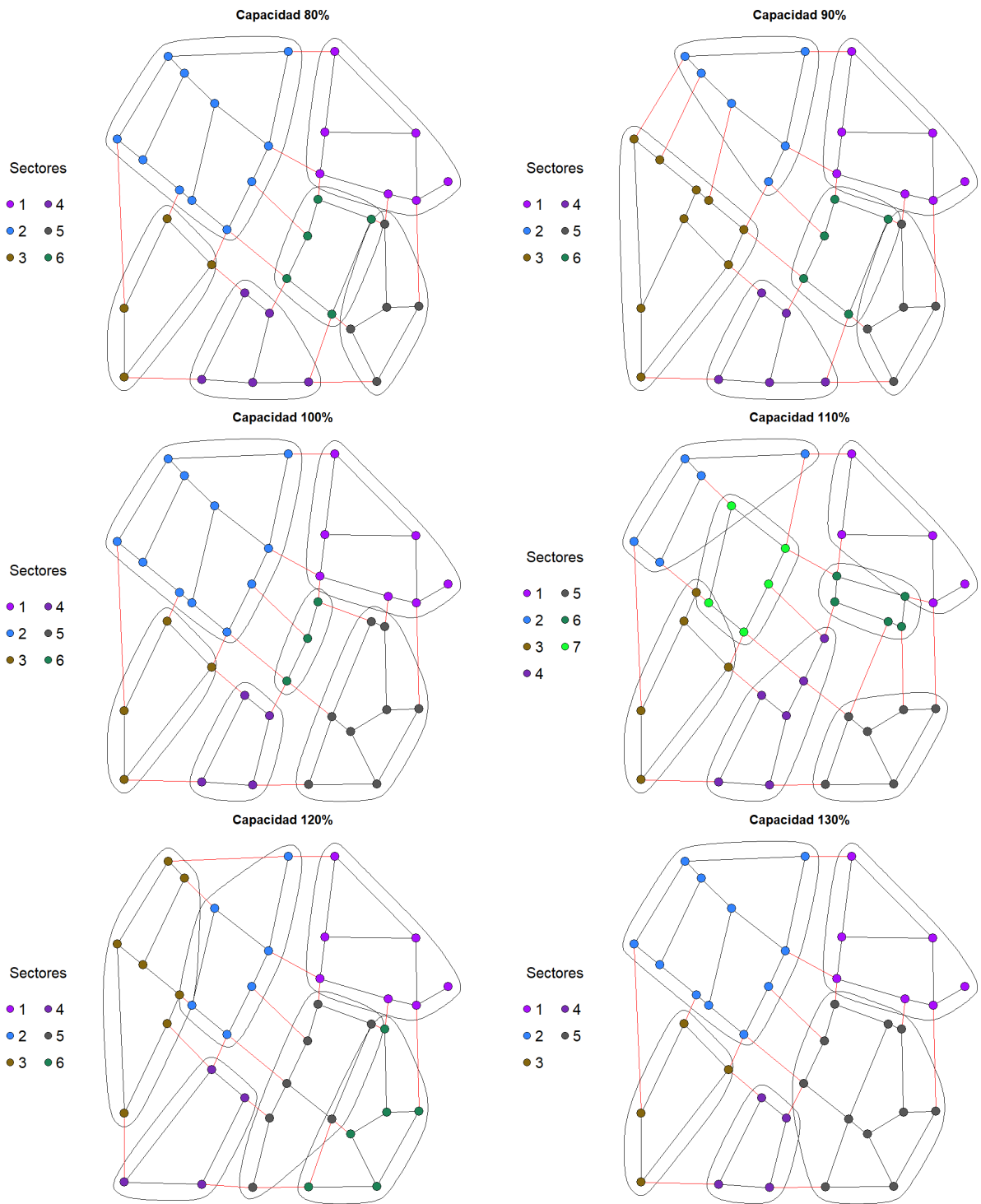


Ilustración 44. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo edge betweenness con peso 4 en las aristas

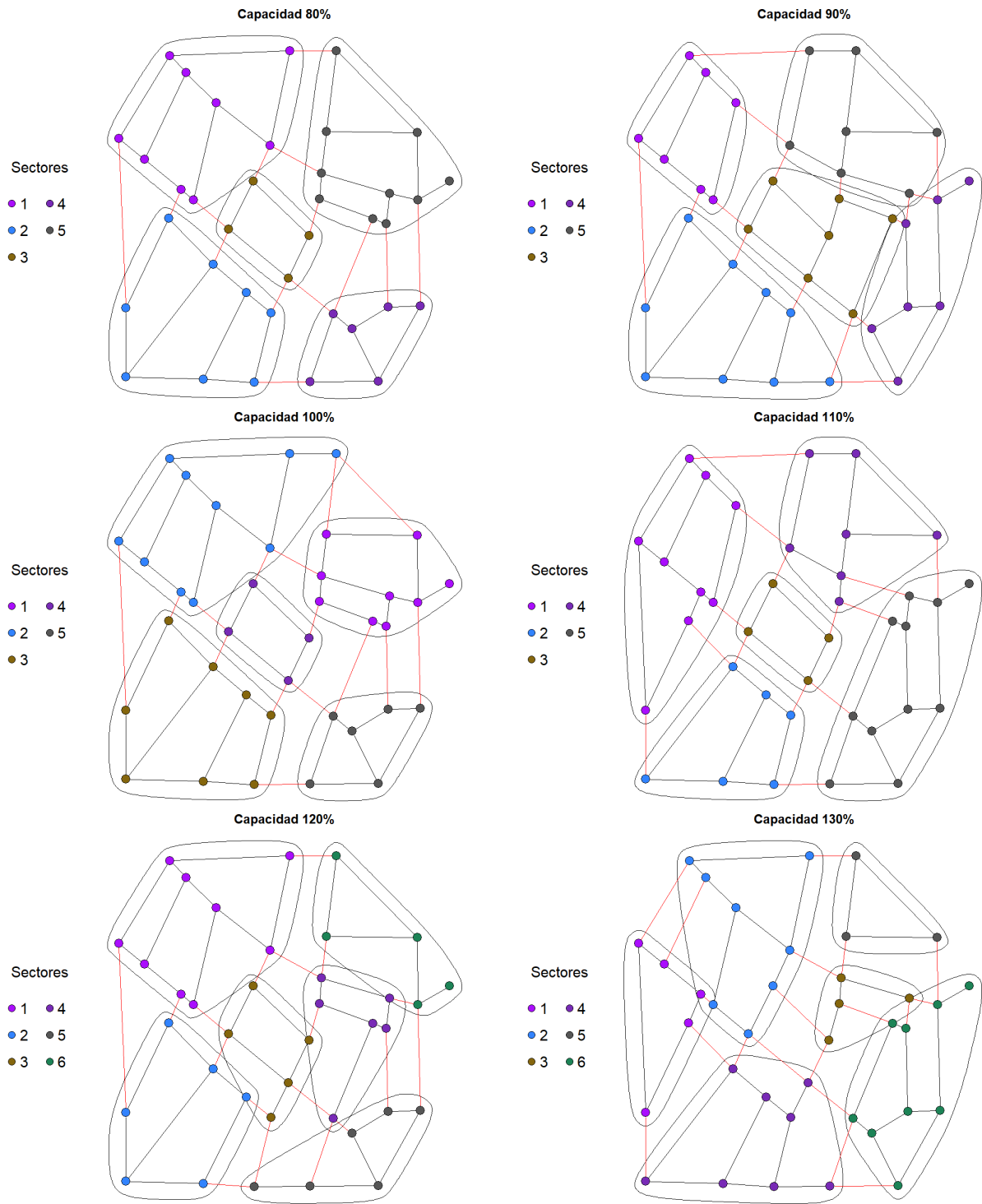


Ilustración 45. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Louvain con peso 4 en las aristas

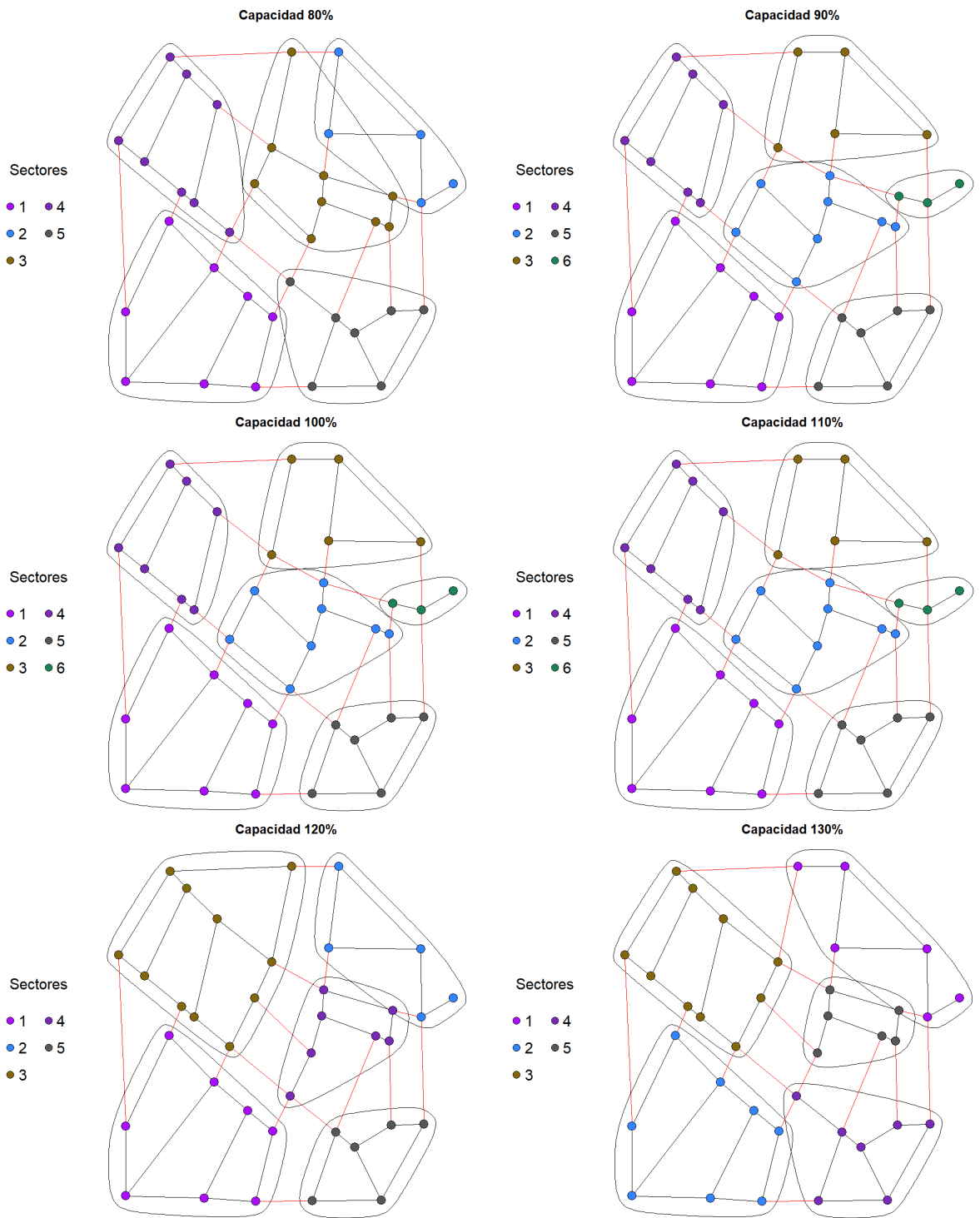


Ilustración 46. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo walktrap con peso 4 en las aristas

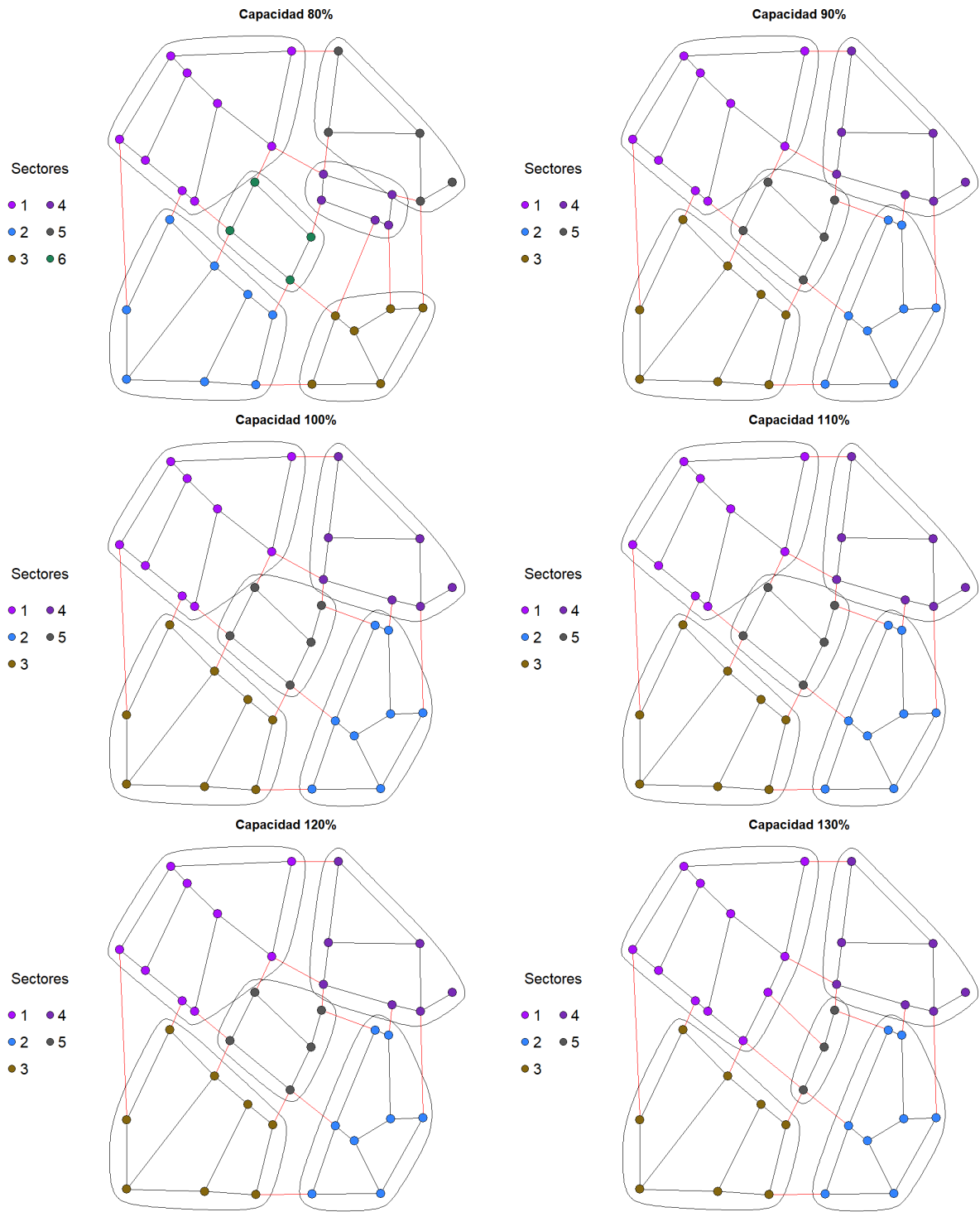


Ilustración 47. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo infomap con peso 4 en las aristas

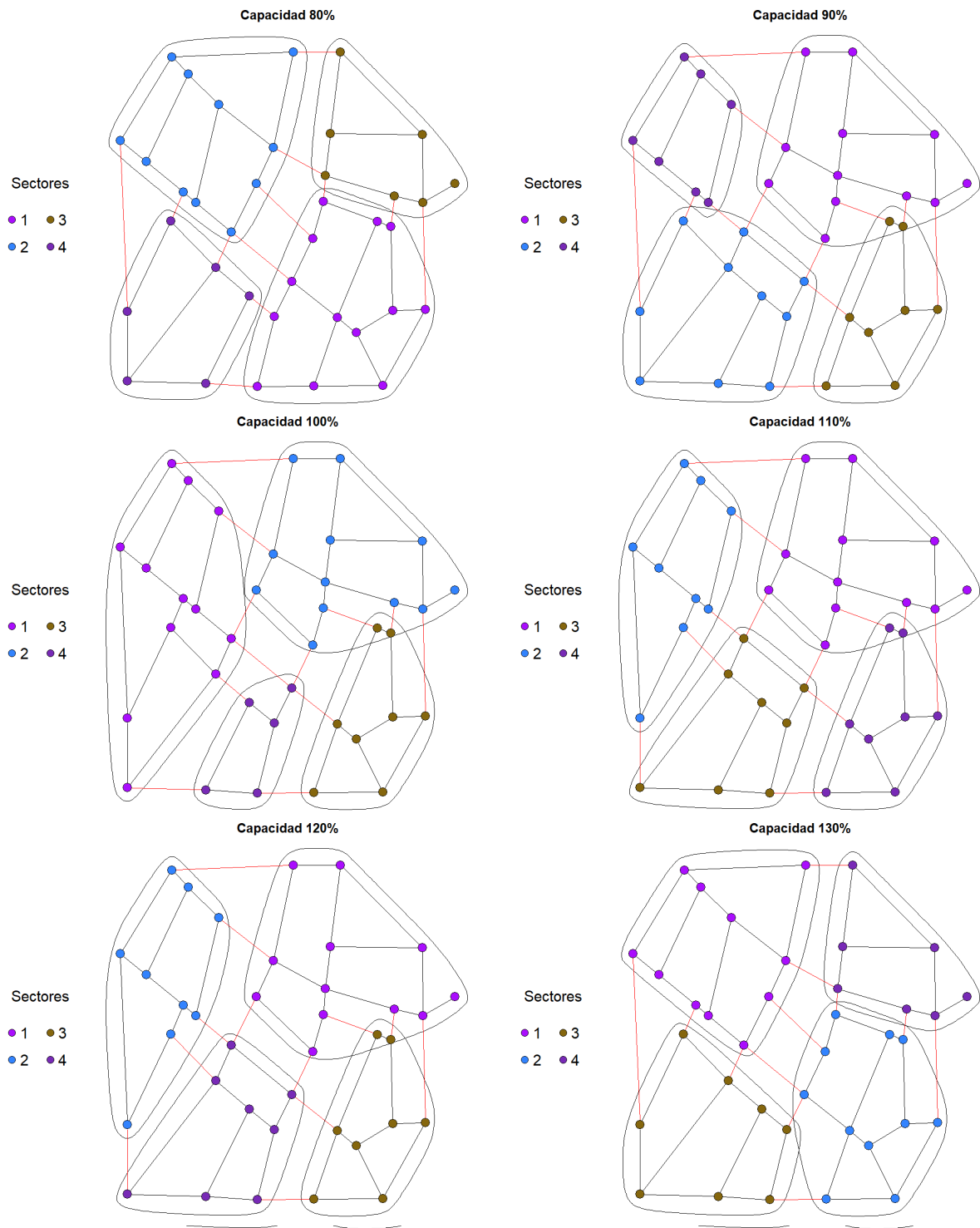


Ilustración 48. Sectores detectados en la red de Fossolo por el algoritmo de Leiden con peso 4 en las aristas

5.3 Determinación de costos de implantación

Como se pudo observar en los apartes anteriores, definir qué algoritmo aporta mejor configuración de sectores en cuanto a la capacidad de trabajo solo con apoyo de las configuraciones o la modularidad de la partición, no es posible. En primer lugar, porque gran parte de las configuraciones son similares y, en segundo lugar, porque la modularidad por sí sola no aporta información del comportamiento hidráulico de la red. Así pues, se hace necesario crear un marco económico para poder evaluar qué configuración resulta más adecuada a los objetivos deseados.

Adicionalmente a lo anteriormente planteado, la sectorización de por sí crea un problema de rendimiento en la red, ya que, al cerrar tramos para generar la conformación de los sectores, se generarán trayectos más largos para alimentar los mismos puntos de consumo. Lo expresado anteriormente, incide en que se produzca una disminución en la capacidad inicial de la red. Esto puede ocasionar que se requiera reforzar algunos tramos para garantizar las presiones de servicio y mantener la capacidad original.

Sin embargo, para cada posible opción de sectorización, deberá considerarse el refuerzo anteriormente mencionado, lo que nos llevará a un problema de optimización combinatorio multiobjetivo.

A nivel de funciones objetivo, deberemos minimizar el costo de los macromedidores a usar en la entrada de los sectores; minimizar el costo de las válvulas de cierre que definirán los límites de cada sector; minimizar los costos de refuerzos en la red; y por último, minimizar la penalización por el no cumplimiento de la capacidad establecida en la sectorización de la red.

$$f(x) = \text{Min}(\text{Costo macros}) \quad , \quad (42)$$

$$f(x) = \text{Min}(\text{Costo valvulas}) \quad , \quad (43)$$

$$f(x) = \text{Min}(\text{Costo refuerzo}) \quad , \quad (44)$$

$$f(x) = \text{Min}(\text{Costo pérdida capacidad}) \quad . \quad (45)$$

Para ello, partiendo del resultado obtenido en la sectorización, se elaborará una lista de tuberías candidatas, las cuales serán aquellas que son frontera entre dos sectores. Para definir cuales permanecerán abiertas y cuales cerradas, se propone usar un algoritmo de

optimización por enjambre de partículas, propuesto originalmente por Kennedy y Eberhart, en 1995 (PSO por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*). Dicho algoritmo, ampliamente usado, basado en la inteligencia de enjambre o colectiva, permite optimizar un problema combinatorio a partir de la conformación de soluciones candidatas y corrigiendo o mejorándolas de manera de cubrir todo el espacio de soluciones posible, convergiendo rápidamente en soluciones óptimas.

Este algoritmo de optimización ha sido aplicado con éxito en una multitud de campos que van desde programación de flujos (Mariappan et al., 2019) hasta la reconstrucción de señales (Yue et al., 2019). Esto es debido a que el algoritmo de optimización ha mostrado alta eficiencia y simplicidad en la solución de problemas de optimización del mundo real. El algoritmo PSO tiene muchas ventajas, como una velocidad de convergencia rápida, ser simple y fácil de implementar, y el algoritmo en sí no tiene muchos parámetros para ajustar, habiendo variantes adaptativas y auto-adaptativas (Babu y Vijayalakshmi, 2013; Montalvo et al., 2010), lo que lo hace más eficiente para optimizar en espacios de búsqueda complejos.

En el campo de la hidráulica son muchas las aproximaciones que se han realizado, como inicialmente Montalvo (2010) lo propuso dentro de su metodología para el diseño óptimo de sistemas de abastecimiento de agua potable y continuó con un mejoramiento en el proceso a través de un procedimiento multiobjetivo (Montalvo et al., 2010b). También se hicieron otras aplicaciones como la de Izquierdo et al., (2008) a el diseño de sistemas de drenajes, ubicación óptima de bombas y turbinas (Meirelles et al., 2017), estimación de demandas de agua (Letting et al., 2017), y programación de bombeo (Carpitella et al., 2018), entre otros.

Dentro del proceso de optimización, se toma una solución candidata (definición de tuberías que permanecerán abiertas y cerradas) y se modelará hidráulicamente la red. En caso de no cumplirse con la presión mínima de servicio requerida se impone una penalización y se calcula el costo del refuerzo necesario para lograr cumplir con ello. Se realiza nuevamente la modelación y se verifica el cumplimiento de las presiones de servicio. A partir de ahí, en las tuberías candidatas que permanecieron abiertas se calcula el costo del micromedidor en función de su diámetro y, para las tuberías que permanecieron cerradas, se realiza el mismo proceso para las válvulas de cierre.

Este proceso será aplicado de forma iterativa a distintas configuraciones de agrupamiento obtenidas por los algoritmos de detección de comunidades, almacenando la solución más

económica. El procedimiento anteriormente expresado se puede apreciar en el pseudo código mostrado en la imagen 49.

Para la modelación se usó el solver PSO del *Optimization Toolbox* incluido en el software Matlab. Como parámetros iniciales se estableció un número de partículas igual a 3 veces el número de variables y un máximo de 1000 iteraciones

Para el cálculo de los costos asociados a cada función objetivo, fueron tomados los valores indicados en la tabla 12. En ella se aprecian los costos de tuberías, válvulas de cierre y macro medidores, todos ellos expresados en unidades monetarias (UM).

Tabla 12. Costos de tuberías y valvulería

Diámetro (mm)	Costo tuberías (UM)/m	Costos válvulas de cierre (UM)	Costos medidores de caudal (UM)
25	0,71	340	2.000
50	2,66	380	2.344
75	5,97	463	2.493
100	12,79	647	3.116
150	26,99	1.155	4.740
200	42,22	1.799	7.908
250	65,68	2.522	10.515
300	104,44	3.805	16.675
350	132,64	6.829	23.971
400	168,27	7.817	35.582
450	213,05	10.551	52.817
500	262,53	13.327	78.402
550	327,85	16.440	116.378
600	392,70	19.890	172.750
700	543	27.800	380.636
800	724,10	37.059	838.693
900	938,40	47.666	1.847.973

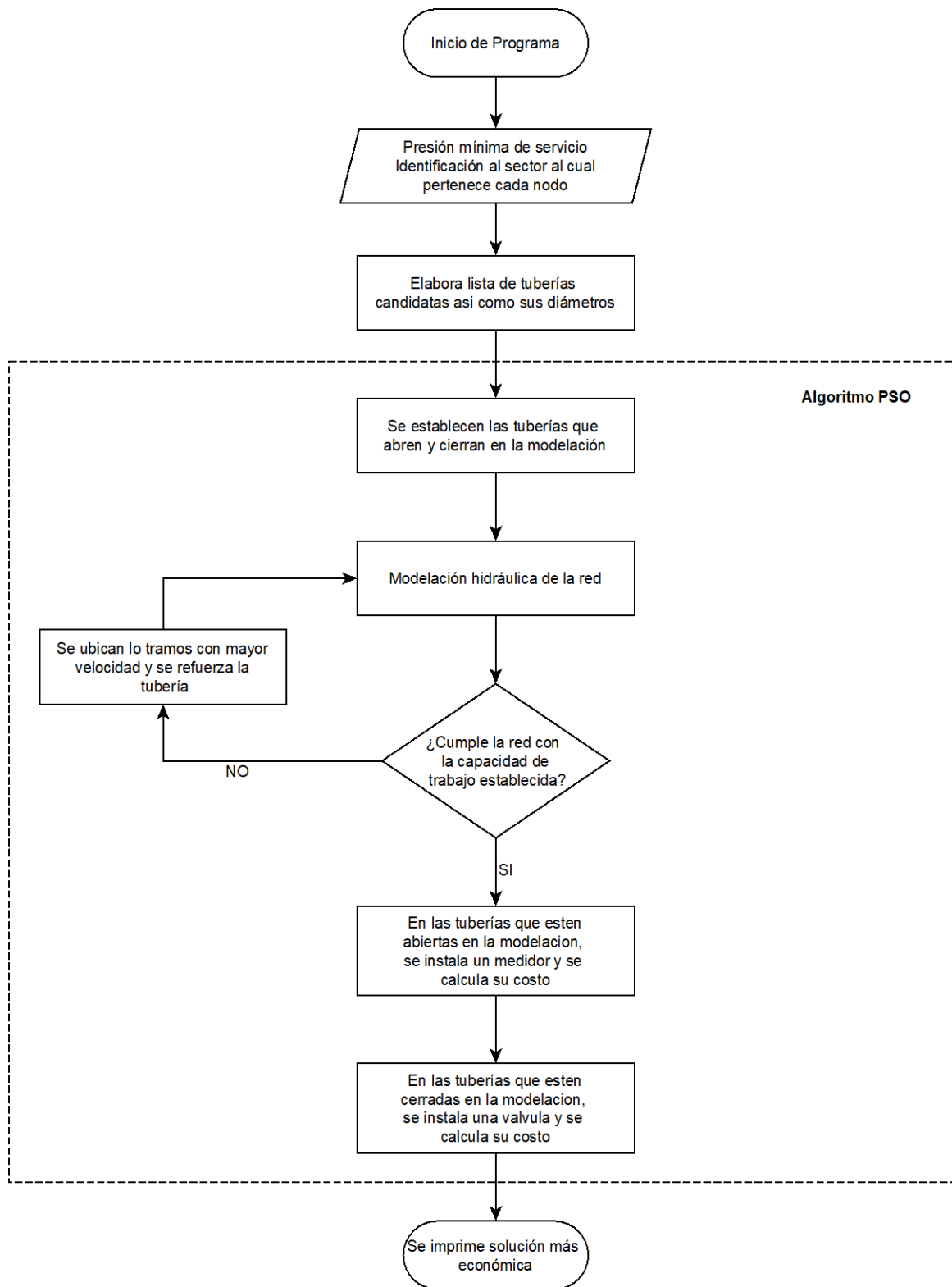


Ilustración 49. Pseudo código para la optimización económica de la solución de la red de Fossolo

De la aplicación del modelo de estimación de costos a las alternativas de sectorización anteriormente obtenidas en el aparte 5.2 para la red de Fossolo, se obtuvieron los resultados expresados en la tabla 13.

Tabla 13. Costo de sectorización de la red de Fossolo con peso 1

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM					
	Capacidad a 80%	Capacidad a 90%	Capacidad a 100%	Capacidad a 110%	Capacidad a 120%	Capacidad a 130%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	25736	25821	26248	40752	48239	54708
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	31870	33537	35590	40820	37342	56674
Algoritmo <i>Louvain</i>	21574	21795	22349	36880	41868	48677
Algoritmo <i>walktrap</i>	23243	24489	25318	32253	37581	52648
Algoritmo <i>infomap</i>	19955	20176	21730	30593	32356	45499
Algoritmo <i>Leiden</i>	14197	15212	21011	30459	31378	36455

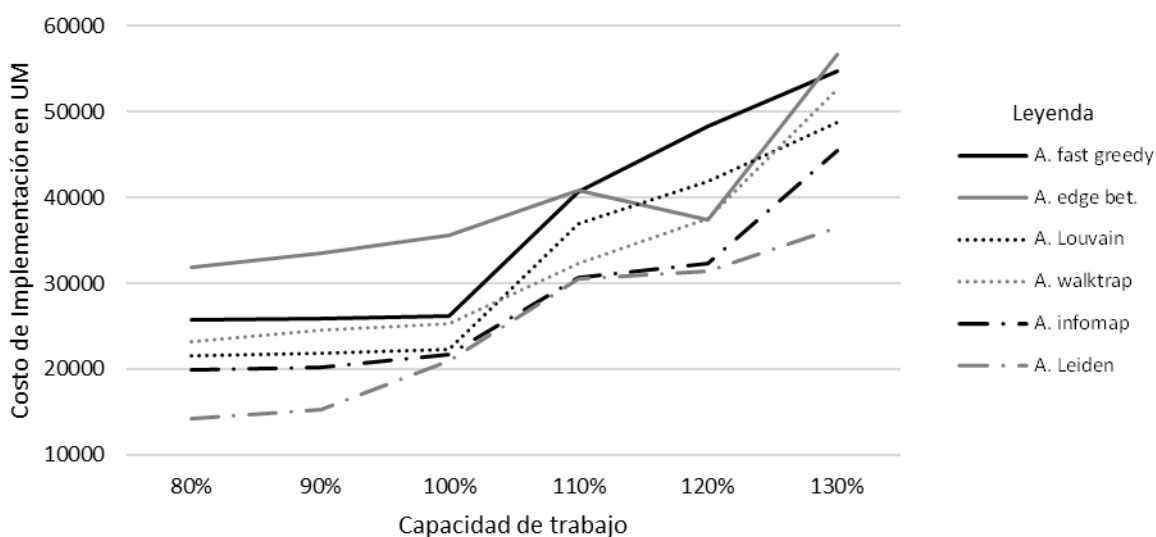


Ilustración 50. Peso 1 Costos vs Capacidad Red de Fossolo

Puede verificarse, en primer lugar y de forma general, cómo a medida que el requerimiento de capacidad aumenta, también lo hace el costo de implementación de la sectorización, lo cual es congruente, ya que, a medida que se incrementa el caudal circulante, también será necesario realizar inversión en el refuerzo de la red para garantizar las presiones mínimas de servicio y, por ende, la capacidad.

Por otro lado, es destacable la diferencia entre los costos de implementación, resultando notable la diferencia con las soluciones halladas por el algoritmo de Leiden. En este orden de ideas, se puede observar en la imagen 50, cómo es la tendencia en el crecimiento del costo de las soluciones, así como el algoritmo de Leiden aporta constantemente la solución más económica.

Continuando con la aplicación del modelo de estimación económico, se puede apreciar en la tabla 14 los costos de sectorización tomando como referencia la aplicación del peso 2 en los tramos de la red.

Tabla 14. Costo de sectorización de la red de Fossolo con peso 2

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM					
	Capacidad a 80%	Capacidad a 90%	Capacidad a 100%	Capacidad a 110%	Capacidad a 120%	Capacidad a 130%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	28870	28870	29540	37552	39439	49536
Algoritmo <i>edge betweeness</i>	21264	22037	22430	35128	40257	44037
Algoritmo <i>Louvain</i>	24566	25047	26707	38688	44334	53826
Algoritmo <i>walktrap</i>	47210	47913	48648	55511	60924	64102
Algoritmo <i>infomap</i>	35977	35977	38133	47379	61697	62641
Algoritmo <i>Leiden</i>	23223	27880	29540	39439	40610	49536

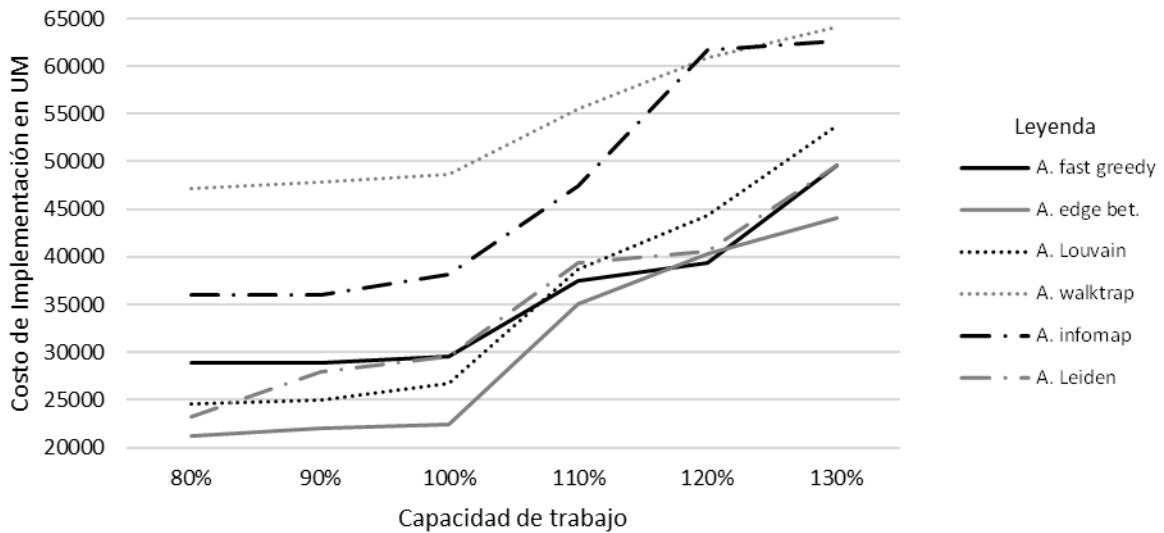


Ilustración 51. Peso 2 Costos vs Capacidad Red de Fossolo

Se aprecia que para este tipo de peso las configuraciones más económicas fueron detectadas por el algoritmo edge betweenness, quedando en segundo lugar el algoritmo de Leiden; sin embargo, es notable que las opciones logradas resultan mucho más costosas que las obtenidas con la aplicación de peso 1.

En la tabla 15, se presentan las soluciones obtenidas con la aplicación del peso 3 en los nodos, para cada uno de los algoritmos de detección de comunidades.

Tabla 15. Costo de sectorización de la red de Fossolo con peso 3

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM					
	Capacidad a 80%	Capacidad a 90%	Capacidad a 100%	Capacidad a 110%	Capacidad a 120%	Capacidad a 130%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	27097	28067	28012	28265	37262	50.970
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	20102	23039	22125	40126	29597	40.348
Algoritmo <i>Louvain</i>	26031	21474	25555	31083	46523	46.912
Algoritmo <i>walktrap</i>	26537	35851	37035	47828	35704	48.001
Algoritmo <i>infomap</i>	29896	22496	24123	31203	36274	39.687
Algoritmo <i>Leiden</i>	12907	16194	16872	18448	26990	35.697

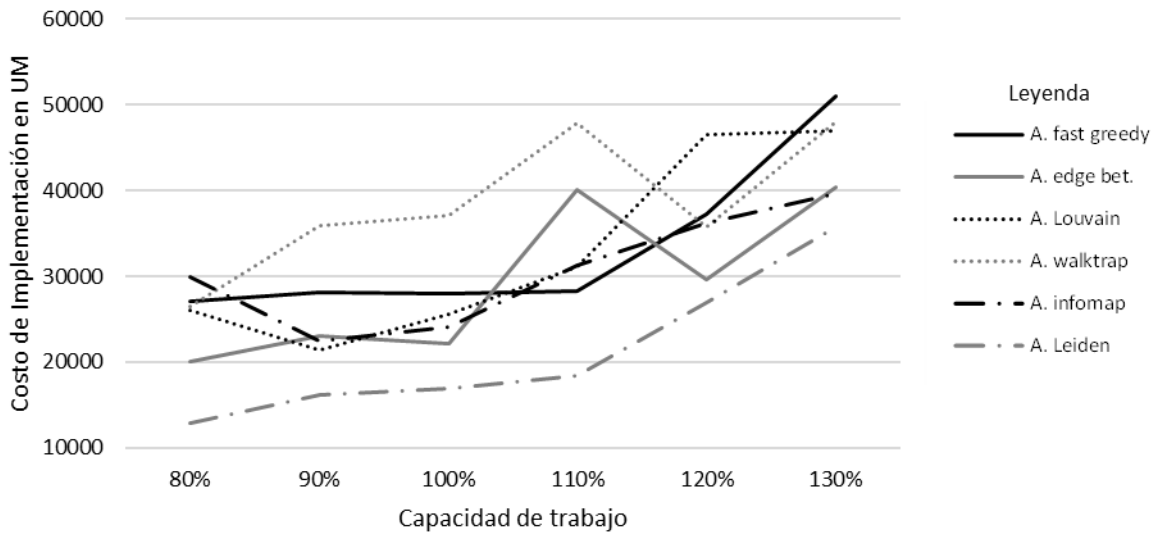


Ilustración 52. Peso 3 Costos vs Capacidad Red de Fossolo

Puede apreciarse, cómo nuevamente el algoritmo de Leiden consigue lograr las mejores soluciones, siendo estas muy similares, a nivel de costo a las obtenidas con la aplicación de peso 1.

Para finalizar, puede observarse en la tabla 16, los costos de las soluciones halladas con la implementación de peso 4 en los tramos de la red.

Tabla 16. Costo de sectorización de la red de Fossolo con peso 4

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM					
	Capacidad a 80%	Capacidad a 90%	Capacidad a 100%	Capacidad a 110%	Capacidad a 120%	Capacidad a 130%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	27097	33435	28012	33576	37262	40.883
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	20102	23039	22125	38235	43100	40.348
Algoritmo <i>Louvain</i>	20104	29002	25555	31083	47884	45.510
Algoritmo <i>walktrap</i>	26537	36021	37035	49027	38309	45.253
Algoritmo <i>infomap</i>	29896	22496	24123	31203	41826	39.683
Algoritmo <i>Leiden</i>	12907	14223	15556	18448	29049	35.697

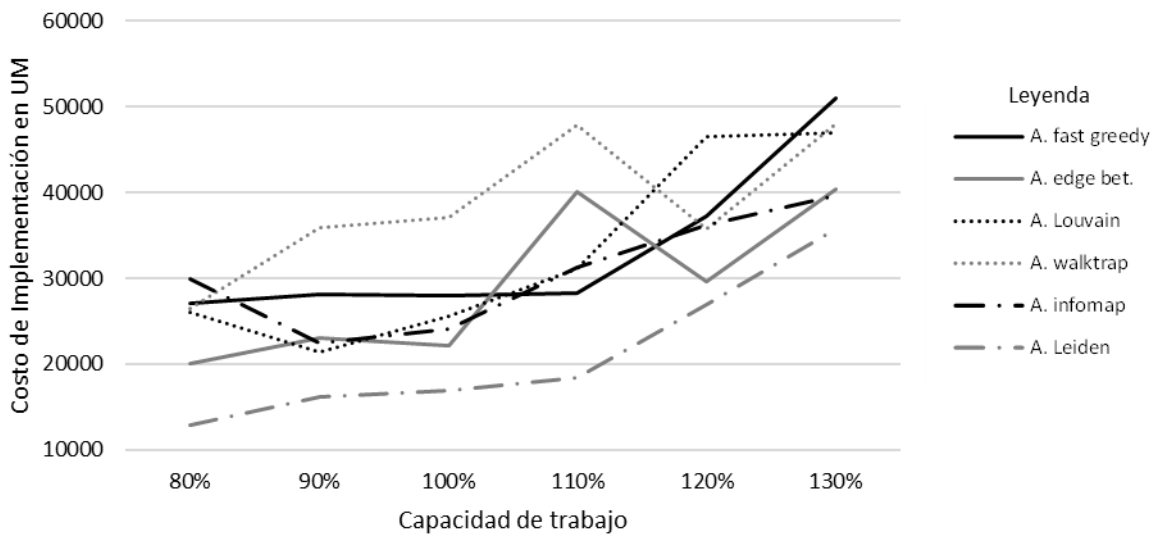


Ilustración 53. Peso 4 Costos vs Capacidad Red de Fossolo

La tendencia es constante, desde el punto de vista del algoritmo que aporta las soluciones más económicas de configuración de la red.

Así pues, a manera de resumen, se presenta la tabla 17, donde pueden apreciarse los resultados de todas las modelaciones ejecutadas.

Tabla 17. Tabla resumen de mejores soluciones para red de Fossolo

Tipo de Peso	Capacidad a 80%	Capacidad a 90%	Capacidad a 100%	Capacidad a 110%	Capacidad a 120%	Capacidad a 130%
Peso 1	A. Leiden 14.197 UM	A. Leiden 15.212 UM	A. Leiden 21.011 UM	A. Leiden 30.459UM	A. Leiden 31.378 UM	A. Leiden 36.455 UM
Peso 2	A. edge bet. 21.264 UM	A. edge bet. 22.037 UM	A. edge bet. 22.430 UM	A. edge bet. 35.128	A. edge bet. 40.257 UM	A. edge bet. 44.037 UM
Peso 3	A. Leiden 12.907 UM	A. Leiden 16.194 UM	A. Leiden 16.872 UM	A. Leiden 18.448 UM	A. Leiden 26.990 UM	A. Leiden 35.697 UM
Peso 4	A. Leiden 12,907 UM	A. Leiden 14.223 UM	A. Leiden 15.556 UM	A. Leiden 18.448 UM	A. Leiden 29.049 UM	A. Leiden 35.697 UM

El algoritmo de Leiden es constante para prácticamente todas las mejores soluciones, así mismo, para la red en estudio, los pesos 3 y 4, aportan las opciones de configuración más económicas.

Para constatar el comportamiento del modelo planteado, este se aplicará a una segunda red de prueba, en este caso con una dimensión mayor, lo cual redundará en un mayor espacio de soluciones.

5.4 Red de Balerna

La segunda red usada como prueba fue la red de Balerna (Reca y Martínez, 2006), la cual es una adaptación de una red de irrigación ubicada en la provincia de Almería, España; formada por cuatro fuentes de abastecimiento, 443 nodos de consumo y 545 tramos formados con tuberías de policloruro de vinilo; su requerimiento de presión mínima original es de 20 mca. La mencionada red ha sido usada para probar algoritmos de diseño óptimo de redes (Geem, 2009; Zheng et al., 2011). En la figura 54 se muestra el esquema de la mencionada red, y en las tablas 18 y 19 se muestra el detalle de los nodos y tramos.



Ilustración 54. Esquema de la red de Balerna

Tabla 18. Datos de los nodos de la red de Balerna

Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)
Nodo 179001	600	2,5	Nodo 151	565	2,5	Nodo 62	35	2,5
Nodo 179	600	2,5	Nodo 152	550	2,5	Nodo 147	330	2,5
Nodo 177	589	2,5	Nodo 107	500	2,5	Nodo 150	450	2,5
Nodo 174	600	2,5	Nodo 108	462	2,5	Nodo 148	290	2,5
Nodo 173	593	2,5	Nodo 109	486	2,5	Nodo 149	190	2,5
Nodo 171001	600	2,5	Nodo 110	476	2,5	Nodo 63	90	2,5
Nodo 171	600	2,5	Nodo 111	471	2,5	Nodo 64	45	2,5
Nodo 172	600	2,5	Nodo 113	479	2,5	Nodo 65	33	2,5
Nodo 170	600	2,5	Nodo 114	460	2,5	Nodo 66	12	2,5
Nodo 165	567	2,5	Nodo 112	456	2,5	Nodo 67	123	2,5
Nodo 166	573	2,5	Nodo 115	500	2,5	Nodo 68	93	2,5
Nodo 168	571	2,5	Nodo 116	500	2,5	Nodo 69	82	2,5
Nodo 169	565	2,5	Nodo 117	475	2,5	Nodo 70	88	2,5
Nodo 163	552	2,5	Nodo 118	450	2,5	Nodo 71	81	2,5
Nodo 164	578	2,5	Nodo 119	460	2,5	Nodo 72	74	2,5
Nodo 162	552	2,5	Nodo 105	558	2,5	Nodo 56	129	2,5
Nodo 161	550	2,5	Nodo 102	545	2,5	Nodo 57	48	2,5
Nodo 106	540	2,5	Nodo 103	515	2,5	Nodo 58	30	2,5
Nodo 124	522	2,5	Nodo 104	524	2,5	Nodo 53	145	2,5
Nodo 125	511	2,5	Nodo 100	531	2,5	Nodo 54	41	2,5
Nodo 125001	494	2,5	Nodo 101	512	2,5	Nodo 52	310	2,5
Nodo 126	493	2,5	Nodo 96	528	2,5	Nodo 46001	330	2,5
Nodo 127	565	2,5	Nodo 97	514	2,5	Nodo 50	200	2,5
Nodo 128	550	2,5	Nodo 98	460	2,5	Nodo 51	44	2,5
Nodo 129	523	2,5	Nodo 99	450	2,5	Nodo 47	131	2,5
Nodo 130	502	2,5	Nodo 93	500	2,5	Nodo 48	71	2,5
Nodo 132	550	2,5	Nodo 94	517	2,5	Nodo 49	16	2,5
Nodo 131001	570	2,5	Nodo 95	514	2,5	Nodo 42	150	2,5
Nodo 131	524	2,5	Nodo 92	400	2,5	Nodo 45	59	2,5
Nodo 133	466	2,5	Nodo 160	329	2,5	Nodo 46	35	2,5
Nodo 134	288	2,5	Nodo 159001	340	2,5	Nodo 41	310	2,5
Nodo 135	600	2,5	Nodo 159	314	2,5	Nodo 35	300	2,5
Nodo 136	433	2,5	Nodo 156	342	2,5	Nodo 36	130	2,5
Nodo 137	250	2,5	Nodo 157	400	2,5	Nodo 39	100	2,5
Nodo 138	236	2,5	Nodo 158	460	2,5	Nodo 40	63	2,5
Nodo 139	425	2,5	Nodo 155	340	2,5	Nodo 37	60	2,5
Nodo 141	500	2,5	Nodo 154	416	2,5	Nodo 91	425	2,5
Nodo 143	383	2,5	Nodo 153	340	2,5	Nodo 90	450	2,5
Nodo 144	368	2,5	Nodo 55	300	2,5	Nodo 89	470	2,5
Nodo 145	270	2,5	Nodo 59	210	2,5	Nodo 31	200	2,5
Nodo 142	240	2,5	Nodo 60	110	2,5	Nodo 32	71	2,5
Nodo 140001	555	2,5	Nodo 61	50	2,5	Nodo 34	44	2,5

Tabla 18. Datos de los nodos red de Balerna (Continuación)

Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)
Nodo 33	46	2,5	Nodo 217	620	2,5	Nodo 241	833	2,5
Nodo 28001	322	2,5	Nodo 218	573	2,5	Nodo 242	878	2,5
Nodo 28	225	2,5	Nodo 201	950	2,5	Nodo 243	836	2,5
Nodo 29	92	2,5	Nodo 203	942	2,5	Nodo 244	781	2,5
Nodo 30	57	2,5	Nodo 204	929	2,5	Nodo 245	835	2,5
Nodo 27	312	2,5	Nodo 205	914	2,5	Nodo 183	877	2,5
Nodo 26	123	2,5	Nodo 211	908	2,5	Nodo 184	857	2,5
Nodo 23	75	2,5	Nodo 212	650	2,5	Nodo 182	950	2,5
Nodo 22	52	2,5	Nodo 206	842	2,5	Nodo 249	941	2,5
Nodo 87	403	2,5	Nodo 207	806	2,5	Nodo 248	950	2,5
Nodo 86	414	2,5	Nodo 208	768	2,5	Nodo 247	908	2,5
Nodo 83	402	2,5	Nodo 209	700	2,5	Nodo 246	850	2,5
Nodo 77	450	2,5	Nodo 210	700	2,5	Nodo 181	930	2,5
Nodo 81	444	2,5	Nodo 213	738	2,5	Nodo 266	714	2,5
Nodo 78	448	2,5	Nodo 200001	950	2,5	Nodo 180004	842	2,5
Nodo 79	458	2,5	Nodo 199	940	2,5	Nodo 190	950	2,5
Nodo 80	466	2,5	Nodo 196	927	2,5	Nodo 191	918	2,5
Nodo 82	469	2,5	Nodo 197	900	2,5	Nodo 180003	900	2,5
Nodo 84	400	2,5	Nodo 198	896	2,5	Nodo 180002	950	2,5
Nodo 85	500	2,5	Nodo 233	872	2,5	Nodo 180001	956	2,5
Nodo 121	500	2,5	Nodo 232	842	2,5	Nodo 180	950	2,5
Nodo 122	493	2,5	Nodo 231	805	2,5	Nodo 287	733	2,5
Nodo 123	473	2,5	Nodo 230	725	2,5	Nodo 286	720	2,5
Nodo 120	495	2,5	Nodo 234	650	2,5	Nodo 285	710	2,5
Nodo 75	470	2,5	Nodo 194	950	2,5	Nodo 284	700	2,5
Nodo 76	474	2,5	Nodo 195	950	2,5	Nodo 200	778	2,5
Nodo 73	325	2,5	Nodo 192	950	2,5	Nodo 274	655	2,5
Nodo 74	400	2,5	Nodo 193	850	2,5	Nodo 275	660	2,5
Nodo 227	528	2,5	Nodo 234001	650	2,5	Nodo 276	710	2,5
Nodo 215001	750	2,5	Nodo 235	715	2,5	Nodo 265	700	2,5
Nodo 215	600	2,5	Nodo 236	760	2,5	Nodo 268	650	2,5
Nodo 219	500	2,5	Nodo 237	830	2,5	Nodo 269	660	2,5
Nodo 220	523	2,5	Nodo 238	813	2,5	Nodo 271	724	2,5
Nodo 221	517	2,5	Nodo 240	830	2,5	Nodo 270	737	2,5
Nodo 222	520	2,5	Nodo 239	863	2,5	Nodo 318	350	2,5
Nodo 223	508	2,5	Nodo 190001	950	2,5	Nodo 317	400	2,5
Nodo 223001	545	2,5	Nodo 187	950	2,5	Nodo 316	460	2,5
Nodo 224	501	2,5	Nodo 188	942	2,5	Nodo 315	450	2,5
Nodo 225	495	2,5	Nodo 189	905	2,5	Nodo 313	450	2,5
Nodo 226	507	2,5	Nodo 186	950	2,5	Nodo 314	400	2,5
Nodo 214	740	2,5	Nodo 185	950	2,5	Nodo 312	456	2,5
Nodo 216	627	2,5	Nodo 235001	755	2,5	Nodo 310	457	2,5

Tabla 18. Datos de los nodos de la red de Balerna (Continuación)

Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)
Nodo 311	484	2,5	Nodo 417	1.040	2,5	Nodo 336	800	2,5
Nodo 309	500	2,5	Nodo 415	1.030	2,5	Nodo 331	757	2,5
Nodo 297	520	2,5	Nodo 414	1.020	2,5	Nodo 332	750	2,5
Nodo 298	550	2,5	Nodo 413	1.000	2,5	Nodo 333	800	2,5
Nodo 299	600	2,5	Nodo 250001	1.000	2,5	Nodo 337	844	2,5
Nodo 296	517	2,5	Nodo 21	48	2,5	Nodo 338	811	2,5
Nodo 294	485	2,5	Nodo 319	469	2,5	Nodo 340	835	2,5
Nodo 293	476	2,5	Nodo 320	475	2,5	Nodo 341	836	2,5
Nodo 291	490	2,5	Nodo 20	110	2,5	Nodo 250	830	2,5
Nodo 295	514	2,5	Nodo 19	32	2,5	Nodo 251	825	2,5
Nodo 288	550	2,5	Nodo 18	80	2,5	Nodo 253	788	2,5
Nodo 289	710	2,5	Nodo 302	500	2,5	Nodo 252	788	2,5
Nodo 290	680	2,5	Nodo 303	500	2,5	Nodo 342	828	2,5
Nodo 282	668	2,5	Nodo 305	510	2,5	Nodo 343	822	2,5
Nodo 277	600	2,5	Nodo 306	548	2,5	Nodo 344	802	2,5
Nodo 278	672	2,5	Nodo 307	548	2,5	Nodo 339	816	2,5
Nodo 279	714	2,5	Nodo 321	500	2,5	Nodo 250003	860	2,5
Nodo 280	736	2,5	Nodo 11	40	2,5	Nodo 250002	886	2,5
Nodo 281	750	2,5	Nodo 322	474	2,5	Nodo 412	900	2,5
Nodo 272	734	2,5	Nodo 323	440	2,5	Nodo 411	897	2,5
Nodo 273	700	2,5	Nodo 301	752	2,5	Nodo 410	897	2,5
Nodo 264	705	2,5	Nodo 300	750	2,5	Nodo 409	870	2,5
Nodo 257001	710	2,5	Nodo 324	534	2,5	Nodo 408	867	2,5
Nodo 258001	744	2,5	Nodo 368	580	2,5	Nodo 407001	850	2,5
Nodo 259001	716	2,5	Nodo 367	598	2,5	Nodo 407	845	2,5
Nodo 260001	753	2,5	Nodo 369	592	2,5	Nodo 345	844	2,5
Nodo 261	764	2,5	Nodo 325	750	2,5	Nodo 346	841	2,5
Nodo 262	760	2,5	Nodo 365	797	2,5	Nodo 347	831	2,5
Nodo 263	758	2,5	Nodo 362	800	2,5	Nodo 348	829	2,5
Nodo 255	826	2,5	Nodo 360001	805	2,5	Nodo 349	828	2,5
Nodo 258	835	2,5	Nodo 360	806	2,5	Nodo 350	842	2,5
Nodo 259	833	2,5	Nodo 359	807	2,5	Nodo 350001	837	2,5
Nodo 260	815	2,5	Nodo 361	795	2,5	Nodo 351	836	2,5
Nodo 256	840	2,5	Nodo 366	794	2,5	Nodo 356	823	2,5
Nodo 257	870	2,5	Nodo 364	800	2,5	Nodo 352	821	2,5
Nodo 254	839	2,5	Nodo 363	805	2,5	Nodo 335	804	2,5
Nodo 250004	850	2,5	Nodo 326	757	2,5	Nodo 406	844	2,5
Nodo 421	981	2,5	Nodo 327	765	2,5	Nodo 405	843	2,5
Nodo 420	998	2,5	Nodo 328	770	2,5	Nodo 404	837	2,5
Nodo 419	1.011	2,5	Nodo 329	777	2,5	Nodo 353	818	2,5
Nodo 418	1.030	2,5	Nodo 330	753	2,5	Nodo 354	815	2,5
Nodo 416	1.030	2,5	Nodo 334	802	2,5	Nodo 355	811	2,5

Tabla 18. Datos de los nodos de la red de Balerna (Continuación)

Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)	Nodo ID	Cotas (m)	Demanda Base (LPS)
Nodo 357	821	2,5	Nodo 10	33	2,5	Nodo 394	564	2,5
Nodo 358	820	2,5	Nodo 9	17	2,5	Nodo 395	556	2,5
Nodo 370	595	2,5	Nodo 8	85	2,5	Nodo 396	404	2,5
Nodo 371	592	2,5	Nodo 2	165	2,5	Nodo 4	142	2,5
Nodo 372	572	2,5	Nodo 1	132	2,5	Nodo 7	100	2,5
Nodo 373	680	2,5	Nodo 3	239	2,5	Nodo 228	498	2,5
Nodo 374	695	2,5	Nodo 385	547	2,5	Nodo 229	496	2,5
Nodo 378	566	2,5	Nodo 17	100	2,5	Nodo 256001	750	2,5
Nodo 379	530	2,5	Nodo 16	81	2,5	Nodo 399	817	2,5
Nodo 380	505	2,5	Nodo 15	67	2,5	Nodo 24	100	2,5
Nodo 381	450	2,5	Nodo 13	124	2,5	Nodo 24001	100	2,5
Nodo 382	450	2,5	Nodo 12	150	2,5	Nodo 25	145	2,5
Nodo 376	562	2,5	Nodo 14	193	2,5	Nodo 45001	320	2,5
Nodo 377	527	2,5	Nodo 6	184	2,5	Nodo 71001	81	2,5
Nodo 383	527	2,5	Nodo 5	125	2,5	Nodo 127001	560	2,5
Nodo 384	560	2,5	Nodo 601	560	0	Nodo 202001	700	2,5
Nodo 396001	804	2,5	Nodo 387	548	2,5	Nodo 301001	750	2,5
Nodo 397	805	2,5	Nodo 388	548	2,5	Nodo 304	508	2,5
Nodo 398	805	2,5	Nodo 389	555	2,5	Nodo 422	1.030	2,5
Nodo 400	817	2,5	Nodo 390	525	2,5	Deposito 38	1.170	
Nodo 401	817	2,5	Nodo 391	530	2,5	Deposito 43	1.270	
Nodo 402	808	2,5	Nodo 392	520	2,5	Deposito 44	1.220	
Nodo 403	809	2,5	Nodo 393	500	2,5	Deposito 88	1.120	

Tabla 19. Datos de los tramos de la red de Balerna

Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería 1	650	1.130	Tubería 67	3.750	1.130	Tubería 118	1.450	1.130
Tubería 2	2.600	1.130	Tubería 68	1.000	1.130	Tubería 121	1.720	1.130
Tubería 3	1.640	1.130	Tubería 69	2.310	1.130	Tubería 122	1.100	1.130
Tubería 4	2.500	2.850	Tubería 70	610	1.130	Tubería 123	2.500	1.130
Tubería 8	1.000	1.628	Tubería 71	2.820	1.130	Tubería 125	1.480	1.130
Tubería 10	680	1.628	Tubería 73	880	1.130	Tubería 126	1.230	1.130
Tubería 11	1.640	1.628	Tubería 74	1.340	1.130	Tubería 127	1.390	1.130
Tubería 12	1.640	1.130	Tubería 77	400	1.130	Tubería 128	2.100	1.266
Tubería 13	650	1.446	Tubería 78	1.890	1.130	Tubería 132	1.590	1.130
Tubería 15	980	1.130	Tubería 81	2.250	1.130	Tubería 133	1.440	1.130
Tubería 16	1.450	1.130	Tubería 82	2.010	1.130	Tubería 134	1.480	1.130
Tubería 17	960	1.446	Tubería 38	660	1.266	Tubería 136	1.610	1.130
Tubería 18	1.810	1.266	Tubería 39	780	1.266	Tubería 137	2.670	1.130
Tubería 19	920	1.130	Tubería 49	1.970	1.266	Tubería 138	3.200	1.628
Tubería 20	1.000	1.130	Tubería 52	1.970	1.130	Tubería 139	4.440	1.628
Tubería 21	1.770	1.266	Tubería 53	1.770	1.130	Tubería 140	1.840	1.130
Tubería 22	1.590	1.130	Tubería 83	850	1.130	Tubería 141	3.220	1.130
Tubería 23	1.550	1.130	Tubería 84	2.220	1.130	Tubería 142	2.280	1.130
Tubería 26	1.680	1.130	Tubería 86	2.880	1.130	Tubería 143	1.290	1.130
Tubería 27	1.030	1.130	Tubería 87	1.300	1.130	Tubería 144	2.540	1.130
Tubería 28	1.130	1.130	Tubería 88	1.270	1.130	Tubería 146	2.240	1.130
Tubería 30	8.500	2.850	Tubería 89	960	1.130	Tubería 147	2.020	1.130
Tubería 32	1.490	1.130	Tubería 91	1.100	1.130	Tubería 148	1.620	1.130
Tubería 33	1.750	1.130	Tubería 92	2.050	1.130	Tubería 149	4.350	1.808
Tubería 34	5.000	2.850	Tubería 94	1.760	1.130	Tubería 150	4.880	2.262
Tubería 35	1.340	1.130	Tubería 95	3.000	1.130	Tubería 151	1.790	1.130
Tubería 40	1.640	1.130	Tubería 96	5.000	1.130	Tubería 152	1.370	1.130
Tubería 41	1.370	1.130	Tubería 97	1.190	1.130	Tubería 153	1.600	1.130
Tubería 42	2.230	1.130	Tubería 98	2.280	1.130	Tubería 154	1.680	1.130
Tubería 43	3.940	2.850	Tubería 99	2.950	1.130	Tubería 155	3.500	2.262
Tubería 44	1.910	1.130	Tubería 101	1.910	1.130	Tubería 157	2.460	1.130
Tubería 46	4.400	1.130	Tubería 102	1.290	1.130	Tubería 159	1.000	1.130
Tubería 47	4.590	1.130	Tubería 103	1.520	1.130	Tubería 164	7.500	1.130
Tubería 50	1.840	1.130	Tubería 104	1.150	1.130	Tubería 167	2.500	2.850
Tubería 56	3.000	1.130	Tubería 105	4.440	1.130	Tubería 169	2.500	2.262
Tubería 57	1.160	1.130	Tubería 108	5.800	1.130	Tubería 170	2.000	2.262
Tubería 58	1.980	1.130	Tubería 110	3.500	1.130	Tubería 171	2.730	1.130
Tubería 59	5.100	1.130	Tubería 112	2.090	1.130	Tubería 172	2.050	1.130
Tubería 61	1.270	1.446	Tubería 113	2.120	1.130	Tubería 173	2.000	2.262
Tubería 62	1.890	1.446	Tubería 114	4.550	1.628	Tubería 174	3.120	1.130
Tubería 63	950	1.130	Tubería 115	2.500	1.446	Tubería 175	3.080	1.130
Tubería 65	2.500	1.130	Tubería 116	1.680	1.446	Tubería 176	400	1.130

Tabla 19. Datos de los nodos tramos de la red de Balerna (Continuación)

Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería 90	3.460	2.850	Tubería 273	1.320	1.130	Tubería 335	1.650	1.130
Tubería 107	3.340	1.130	Tubería 274	1.060	1.130	Tubería 336	690	1.130
Tubería 191	730	1.130	Tubería 275	1.600	1.130	Tubería 338	2.000	4.522
Tubería 192	1.140	1.130	Tubería 276	2.250	1.130	Tubería 342	900	1.130
Tubería 193	930	1.130	Tubería 277	930	1.130	Tubería 343	1.370	1.130
Tubería 198	1.610	1.130	Tubería 278	3.250	2.850	Tubería 346	580	1.130
Tubería 199	2.210	1.130	Tubería 279	1.060	1.130	Tubería 348	1.070	1.130
Tubería 200	1.500	1.130	Tubería 280	1.940	1.130	Tubería 350	1.180	1.130
Tubería 201	2.540	1.130	Tubería 282	1.030	1.130	Tubería 351	1.770	1.130
Tubería 202	1.600	1.130	Tubería 284	1.490	1.446	Tubería 352	1.530	1.130
Tubería 204	4.000	2.850	Tubería 288	1.380	1.130	Tubería 353	1.330	1.266
Tubería 208	660	1.130	Tubería 289	1.460	1.130	Tubería 354	1.700	1.130
Tubería 212	1.270	1.130	Tubería 291	1.470	1.628	Tubería 355	2.100	1.266
Tubería 220	1.050	1.130	Tubería 207	3.980	2.850	Tubería 356	1.650	1.266
Tubería 224	1.870	1.130	Tubería 292	1.310	2.850	Tubería 357	1.150	1.130
Tubería 226	860	1.130	Tubería 294	380	1.130	Tubería 358	1.630	1.446
Tubería 227	1.260	1.130	Tubería 295	780	1.130	Tubería 359	1.000	1.446
Tubería 228	2.500	1.130	Tubería 296	2.870	1.808	Tubería 361	1.100	1.130
Tubería 229	1.160	1.130	Tubería 297	2.530	1.808	Tubería 362	1.820	1.130
Tubería 230	2.690	1.130	Tubería 299	2.150	1.130	Tubería 363	930	1.628
Tubería 231	420	1.130	Tubería 300	1.700	1.130	Tubería 364	1.510	1.628
Tubería 244	3.290	1.130	Tubería 301	1.350	1.130	Tubería 365	850	1.808
Tubería 245	1.450	1.130	Tubería 302	1.450	1.266	Tubería 366	3.000	2.850
Tubería 246	560	1.130	Tubería 304	2.540	1.266	Tubería 367	2.500	1.808
Tubería 247	1.710	1.130	Tubería 306	1.030	1.130	Tubería 369	1.320	1.130
Tubería 249	2.360	1.130	Tubería 307	850	1.130	Tubería 373	2.110	1.130
Tubería 251	2.640	3.618	Tubería 308	6.000	3.618	Tubería 374	690	1.130
Tubería 254	1.080	1.446	Tubería 311	3.000	3.618	Tubería 375	4.000	1.628
Tubería 255	1.250	1.266	Tubería 312	1.000	1.628	Tubería 376	2.590	1.628
Tubería 256	1.900	1.130	Tubería 313	3.060	1.446	Tubería 379	1.550	1.446
Tubería 257	2.690	1.130	Tubería 315	2.560	1.446	Tubería 380	1.870	1.266
Tubería 258	2.270	1.266	Tubería 316	2.390	1.266	Tubería 381	2.220	1.130
Tubería 259	1.100	1.266	Tubería 317	4.500	3.618	Tubería 382	820	1.130
Tubería 260	1.100	1.130	Tubería 318	1.300	1.130	Tubería 385	2.200	1.130
Tubería 261	1.400	1.130	Tubería 322	2.680	2.850	Tubería 386	3.000	1.130
Tubería 262	2.840	1.130	Tubería 323	700	1.130	Tubería 394	2.700	1.446
Tubería 263	2.980	1.130	Tubería 324	4.710	1.130	Tubería 397	780	1.130
Tubería 265	2.000	2.262	Tubería 325	1.760	1.130	Tubería 401	900	1.130
Tubería 268	1.500	2.262	Tubería 328	1.900	3.618	Tubería 404	1.230	1.130
Tubería 269	1.930	2.850	Tubería 332	1.580	1.130	Tubería 405	860	1.130
Tubería 271	730	1.446	Tubería 333	2.060	1.130	Tubería 406	810	1.130
Tubería 272	1.560	1.266	Tubería 334	830	1.130	Tubería 407	510	1.130

Tabla 19. Datos de los tramos de la red de Balerna (Continuación)

Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería 408	2.120	1.130	Tubería 482	4.000	1.446	Tubería 544	670	1.130
Tubería 409	4.000	1.446	Tubería 485	680	1.130	Tubería 545	550	1.130
Tubería 414	2.180	1.130	Tubería 486	4.590	2.262	Tubería 546	1.670	1.130
Tubería 415	1.090	1.130	Tubería 487	3.100	1.808	Tubería 547	810	1.130
Tubería 416	550	1.130	Tubería 489	1.690	1.628	Tubería 548	2.250	1.130
Tubería 417	2.140	1.266	Tubería 490	1.760	1.628	Tubería 549	440	1.130
Tubería 418	1.450	1.446	Tubería 492	3.920	1.628	Tubería 550	900	2.262
Tubería 419	3.290	3.618	Tubería 496	2.460	1.130	Tubería 552	2.860	2.262
Tubería 421	3.720	3.618	Tubería 497	870	1.130	Tubería 554	1.460	1.130
Tubería 422	3.680	3.618	Tubería 498	640	1.130	Tubería 555	1.700	1.130
Tubería 423	960	1.130	Tubería 499	2.330	1.130	Tubería 557	2.220	1.130
Tubería 424	790	1.130	Tubería 500	900	1.130	Tubería 558	310	1.130
Tubería 428	1.810	1.130	Tubería 501	1.740	1.130	Tubería 563	690	1.130
Tubería 429	3.200	1.130	Tubería 503	510	1.130	Tubería 564	2.970	1.130
Tubería 430	2.360	1.130	Tubería 506	1.080	2.850	Tubería 565	830	1.130
Tubería 434	630	1.130	Tubería 508	1.900	3.618	Tubería 567	770	1.130
Tubería 435	1.640	1.130	Tubería 509	2.930	2.850	Tubería 568	1.300	1.130
Tubería 438	2.800	1.130	Tubería 510	1.680	3.618	Tubería 571	2.570	1.130
Tubería 439	1.030	1.130	Tubería 511	3.170	2.850	Tubería 575	7.200	1.130
Tubería 441	1.500	1.130	Tubería 512	3.420	2.850	Tubería 576	3.510	1.130
Tubería 442	460	1.130	Tubería 513	4.150	1.628	Tubería 578	1.880	1.266
Tubería 443	3.140	1.130	Tubería 514	1.420	2.850	Tubería 579	1.590	1.266
Tubería 446	2.640	1.130	Tubería 515	1.830	1.130	Tubería 580	1.890	1.266
Tubería 450	2.290	1.130	Tubería 517	1.310	1.130	Tubería 581	830	1.130
Tubería 457	2.650	1.130	Tubería 519	750	1.130	Tubería 588	2.000	1.446
Tubería 458	510	1.130	Tubería 520	3.620	1.130	Tubería 589	940	1.130
Tubería 459	870	1.130	Tubería 521	3.920	1.130	Tubería 590	1.280	1.130
Tubería 460	3.630	2.262	Tubería 522	2.360	2.850	Tubería 605	670	2.262
Tubería 464	1.630	1.446	Tubería 523	1.680	1.130	Tubería 606	1.700	2.262
Tubería 465	1.360	1.266	Tubería 524	2.630	1.130	Tubería 607	1.760	1.266
Tubería 467	2.000	1.266	Tubería 525	840	1.130	Tubería 608	1.050	1.266
Tubería 468	590	1.130	Tubería 526	500	1.130	Tubería 609	1.360	1.130
Tubería 469	590	1.130	Tubería 530	1.820	1.130	Tubería 610	1.280	1.130
Tubería 471	810	1.130	Tubería 532	1.580	1.628	Tubería 611	400	1.266
Tubería 472	1.420	1.130	Tubería 535	1.020	1.130	Tubería 612	650	1.266
Tubería 473	2.480	1.130	Tubería 536	690	1.130	Tubería 613	830	1.130
Tubería 474	1.100	1.130	Tubería 537	1.210	1.130	Tubería 614	2.570	1.130
Tubería 476	660	1.130	Tubería 538	810	1.130	Tubería 615	850	1.130
Tubería 477	990	1.130	Tubería 539	960	1.130	Tubería 616	1.510	1.130
Tubería 479	4.150	2.262	Tubería 540	870	1.130	Tubería 617	3.260	1.130
Tubería 480	14.500	1.130	Tubería 542	1.950	1.130	Tubería 618	1.350	1.130
Tubería 481	3.500	1.130	Tubería 543	2.090	1.266	Tubería 620	2.220	1.130

Tabla 19. Datos de los tramos de la red de Balerna (Continuación)

Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tubería ID	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería 593	2.250	2.850	Tubería 236	1.410	1.628	Tubería 290	7.500	1.130
Tubería 600	1.010	1.130	Tubería 237	750	1.628	Tubería 168	1.036	1.130
Tubería 601	1.010	1.130	Tubería 238	2.270	1.130	Tubería 182	2.190	1.130
Tubería 160	1.490	1.130	Tubería 239	3.970	1.130	Tubería 186	2.140	1.130
Tubería 161	2.180	1.130	Tubería 240	1.620	1.130	Tubería 197	800	2.262
Tubería 24	5.690	3.618	Tubería 266	1.770	1.446	Tubería 321	230	1.130
Tubería 298	8.160	1.130	Tubería 329	700	1.130	Tubería 368	1.210	1.130
Tubería 331	3.200	1.130	Tubería 330	3.500	1.628	Tubería 370	1.000	2.850
Tubería 390	740	1.130	Tubería 337	3.500	1.130	Tubería 383	1.020	1.130
Tubería 392	1.500	3.618	Tubería 179	8.200	1.130	Tubería 145	520	1.130
Tubería 393	3.170	3.618	Tubería 219	1.750	1.130	Tubería 185	1.160	1.266
Tubería 400	2.620	1.130	Tubería 222	1.690	1.130	Tubería 398	790	1.130
Tubería 119	3.140	1.130	Tubería 243	1.350	2.850	Tubería 399	820	1.130
Tubería 120	4.190	1.130	Tubería 267	2.130	2.850	Tubería 402	1.570	1.130
Tubería 124	3.450	1.130	Tubería 344	4.740	2.850	Tubería 433	3.810	3.618
Tubería 177	6.710	1.130	Tubería 345	2.800	2.850	Tubería 190	3.630	1.130
Tubería 75	4.210	1.130	Tubería 349	18.000	3.618	Tubería 51	25.000	2.850
Tubería 181	7.000	1.130	Tubería 165	6.110	3.618	Tubería 166	7.520	1.446
Tubería 184	6.030	1.808	Tubería 194	3.540	4.522	Tubería 209	1.000	1.130
Tubería 187	4.770	1.130	Tubería 64	2.090	1.130	Tubería 218	1.770	2.262
Tubería 196	3.800	2.262	Tubería 106	5.000	1.130	Tubería 221	5.000	1.130
Tubería 213	2.060	1.446	Tubería 183	4.000	1.446	Tubería 232	1.000	1.130
Tubería 214	6.160	2.262	Tubería 206	440	1.130	Tubería 248	5.000	1.808
Tubería 131	3.470	1.130	Tubería 216	3.000	1.628	Tubería 5	2.000	1.130
Tubería 234	2.490	1.808	Tubería 188	8.000	2.850			
Tubería 235	1.840	1.808	Tubería 223	3.450	3.618			

En el caso de esta red de prueba, se probarán nuevamente todos los pesos anteriormente establecidos para los tramos; a su vez, se establecieron las capacidades de trabajo en 90%, 95%, 100%, 105% de la capacidad máxima de la red.

En la tabla siguiente, se muestran los resultados del modelo aplicado a los resultados obtenidos aplicando el peso 1 a los tramos de la red de Balerna.

Tabla 20. Costo de sectorización de la red de Balerna con peso 1

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM			
	Capacidad a 90%	Capacidad a 95%	Capacidad a 100%	Capacidad a 105%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	103827	103827	113703	429282
Algoritmo <i>edge betweenness</i>	184182	186651	184182	577401
Algoritmo <i>Louvain</i>	103790	103790	108728	440856
Algoritmo <i>walktrap</i>	141224	143693	144150	459729
Algoritmo <i>infomap</i>	115673	118142	122235	445221
Algoritmo <i>Leiden</i>	90231	90231	98704	418258

Puede apreciarse en la tabla 20, en primer lugar, cómo el algoritmo de Leiden ofrece las soluciones de sectorización más económicas para todas las capacidades de trabajo establecidas en la red y para el peso estudiado.

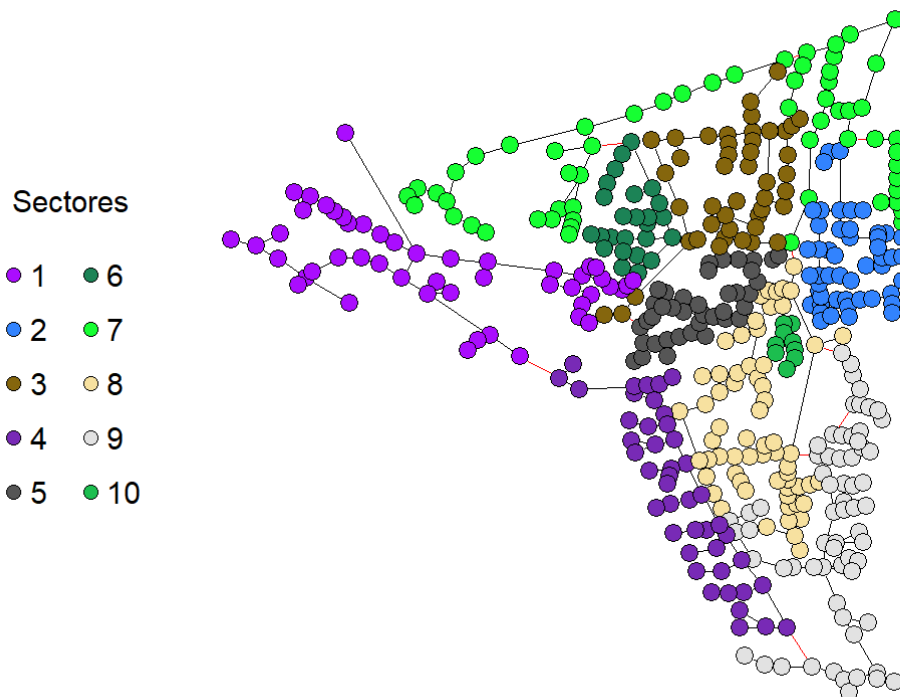


Ilustración 55. Red de Balerna sectorizada para trabajar a 90 y 95% de su capacidad

Se puede apreciar que para las capacidades de trabajo comprendidas entre 90 y 95% el esquema de sectorización más económico resulta igual, por lo que en la figura 55, se pueden distinguir cómo queda configurada la red, en este caso con 10 sectores, tal y como quedan identificados en el código de colores.

Sin embargo, esta configuración no se mantiene cuando se intenta configurar la red para trabajar a otras capacidades, tal y como se aprecia en la figura 56; cuando se requiere que la red trabaje a 100% de su capacidad el esquema de sectorización cambia, según se muestra en la imagen.

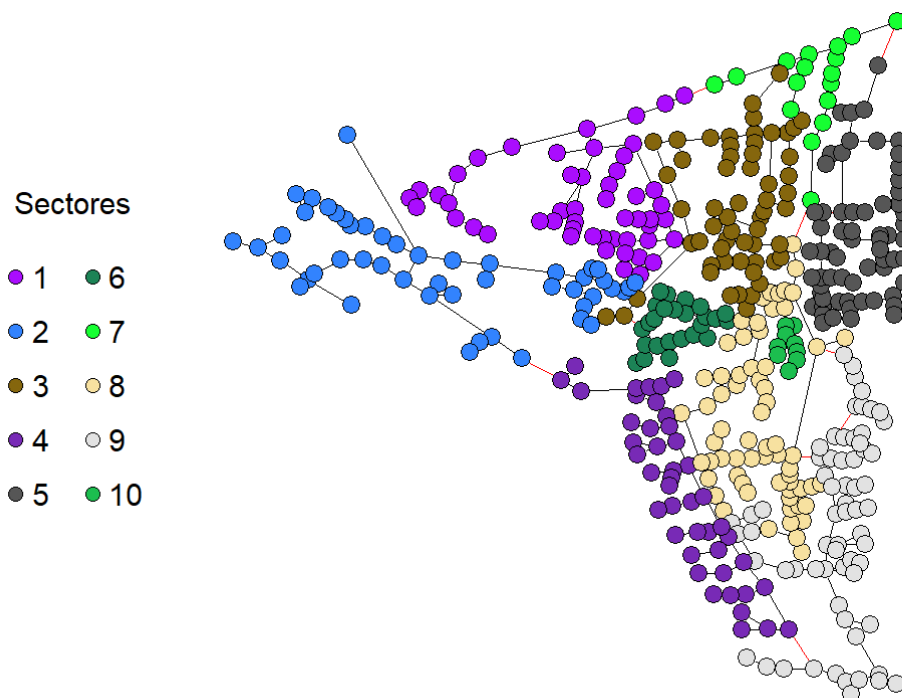


Ilustración 56. Red de Balerna sectorizada para trabajar a 100% de su capacidad

Los mismo ocurre cuando se genera el esquema de sectorización para la red trabajar a 105% de su capacidad: vuelve a generarse otra configuración que, si bien mantiene similitudes a grandes rasgos, no genera un patrón que se pueda aprovechar. Obsérvese la imagen 57, donde está presente la configuración de la red para trabajar a 105 % de su capacidad.

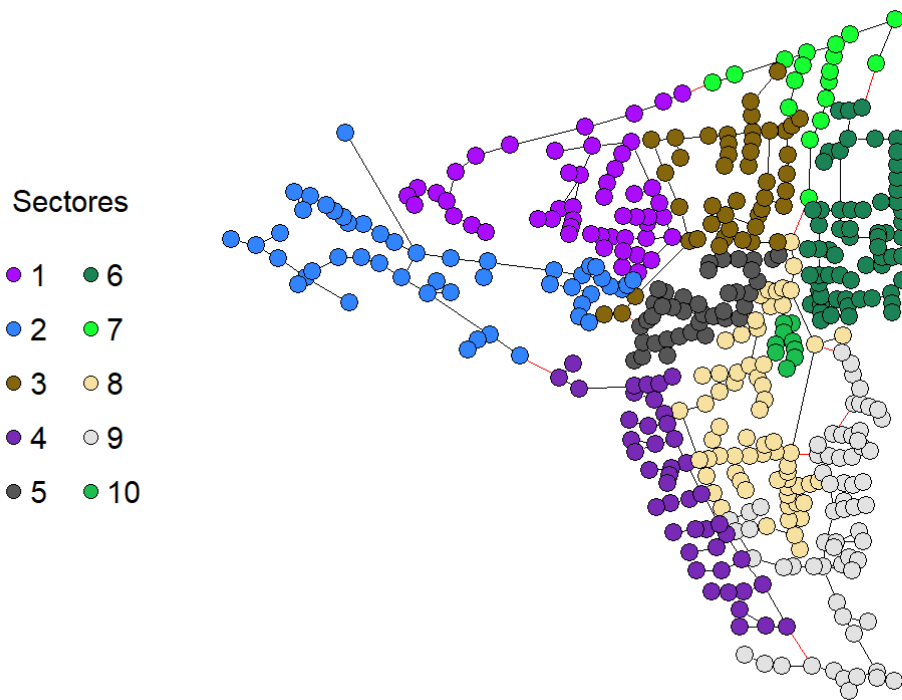


Ilustración 57. Red de Balerna sectorizada para trabajar a 105 % de su capacidad

En cuanto al patrón de costos de todas las alternativas generadas, se puede apreciar en la imagen 58 cómo es su comportamiento, reafirmando que el algoritmo de Leiden aporta soluciones más económicas para cada una de las capacidades.

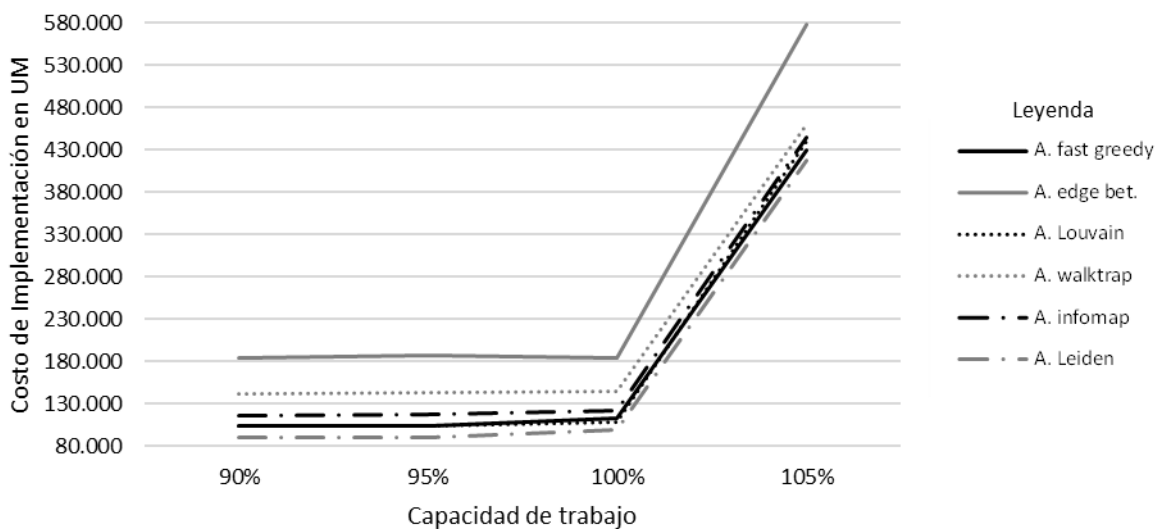


Ilustración 58. Peso 1 Costos vs Capacidad red de Balerna

Se aplicó en el modelo al peso 2, 3 y 4 en los tramos, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 21. Costo de sectorización de la red de Balerma con peso 2

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM			
	Capacidad a 90%	Capacidad a 95%	Capacidad a 100%	Capacidad a 105%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	135051	135051	137520	469648
Algoritmo <i>edge betweeness</i>	122595	125064	125064	506672
Algoritmo <i>Louvain</i>	135051	135051	137520	469648
Algoritmo <i>walktrap</i>	189765	189765	192234	520269
Algoritmo <i>infomap</i>	143752	148690	146221	475880
Algoritmo <i>Leiden</i>	135051	135051	137520	470309

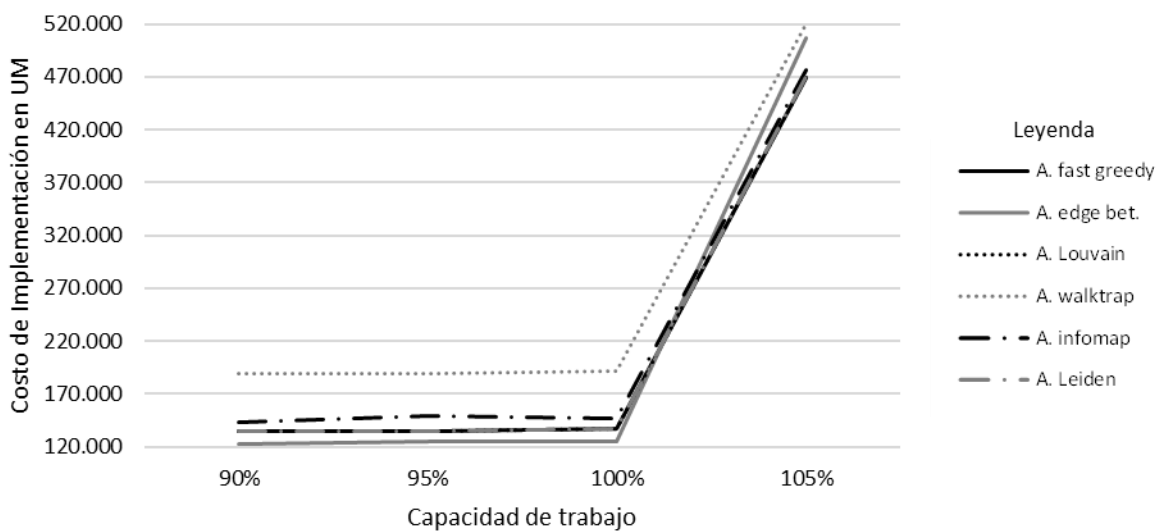


Ilustración 59. Peso 2 Costos vs Capacidad red de Balerma

Tabla 22. Costo de sectorización de la red de Balerna con peso 3

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM			
	Capacidad a 90%	Capacidad a 95%	Capacidad a 100%	Capacidad a 105%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	118458	130795	149074	472237
Algoritmo <i>edge betweeness</i>	152575	152575	152575	485402
Algoritmo <i>Louvain</i>	111329	107836	154251	465544
Algoritmo <i>walktrap</i>	139806	139041	186736	451055
Algoritmo <i>infomap</i>	107115	120636	117242	454771
Algoritmo <i>Leiden</i>	103162	103162	105927	420511

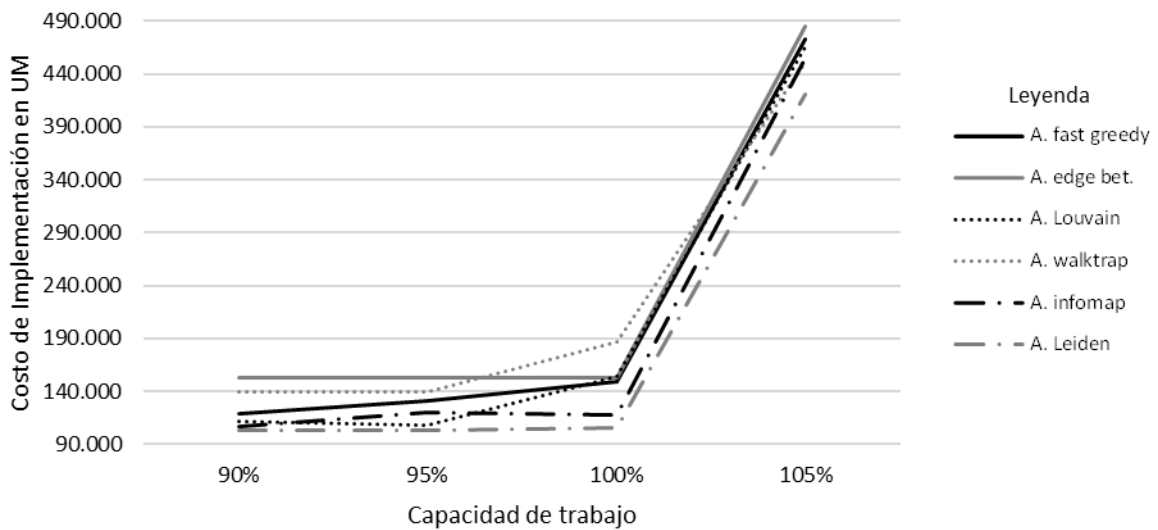


Ilustración 60. Peso 3 Costos vs Capacidad red de Balerna

Tabla 23. Costo de sectorización de la red de Balerna con peso 4

Algoritmo de Sectorización	Costo de implementación en UM			
	Capacidad a 90%	Capacidad a 95%	Capacidad a 100%	Capacidad a 105%
Algoritmo <i>fast greedy</i>	132034	128808	149070	455409
Algoritmo <i>edge betweeness</i>	152575	152575	152575	487871
Algoritmo <i>Louvain</i>	146240	108040	154251	447225
Algoritmo <i>walktrap</i>	183200	126247	189205	457267
Algoritmo <i>infomap</i>	106218	109584	116793	444431
Algoritmo <i>Leiden</i>	103300	103300	107646	423975

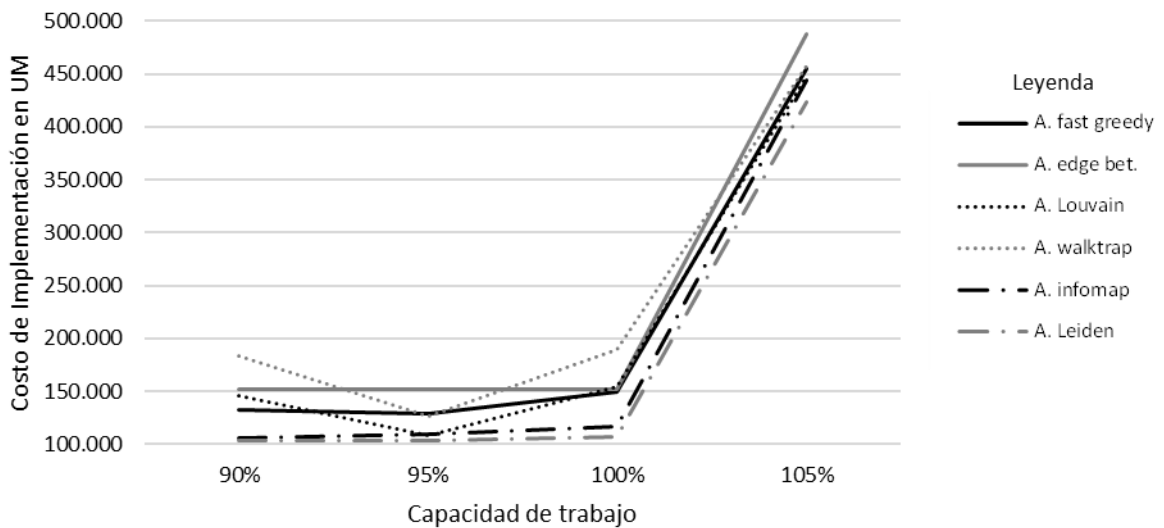


Ilustración 61. Peso 4 Costos vs Capacidad red de Balerna

En la tabla 24, se presenta un resumen de las mejores soluciones obtenidas por peso, indicando adicionalmente el algoritmo que las logró.

Tabla 24. Tabla resumen de mejores soluciones para red de Balerna

Tipo de Peso	Capacidad a 90%	Capacidad a 95%	Capacidad a 100%	Capacidad a 105%
Peso 1	<i>A. Leiden</i> 90.231 UM	<i>A. Leiden</i> 90.231 UM	<i>A. Leiden</i> 98.704 UM	<i>A. Leiden</i> 418.258 UM
Peso 2	<i>A. edge bet.</i> 122.595 UM	<i>A. edge bet.</i> 125.064 UM	<i>A. edge bet.</i> 125.064 UM	<i>A. Louvain</i> 469.648
Peso 3	<i>A. Leiden</i> 103.162 UM	<i>A. Leiden</i> 103.162 UM	<i>A. Leiden</i> 105.927 UM	<i>A. Leiden</i> 420.511 UM
Peso 4	<i>A. Leiden</i> 103.300 UM	<i>A. Leiden</i> 103.300 UM	<i>A. Leiden</i> 107.646 UM	<i>A. Leiden</i> 423.975 UM

Se aprecia claramente como el algoritmo de Leiden aporta prácticamente las mejores soluciones en todos los casos. Sin embargo, a diferencia de la red de Fossolo, en este caso el peso 1 en los nodos aporta las soluciones más económicas para esta red. Esto es debido a que, al aumentar el tamaño de la red, aumenta en igual medida el espacio de soluciones, generando más alternativas de solución.

6. CONTROL DE PÉRDIDAS

6. CONTROL DE PÉRDIDAS

Toda el agua que ingresa a la red de distribución y que no es estrictamente útil al abonado es una pérdida. Por ello tiene tanta importancia la reducción del volumen fugado. Y para poder actuar sobre las fugas es imprescindible conocer al detalle tanto su comportamiento como su control.

Las pérdidas de agua en las redes de distribución, en una primera clasificación general, se pueden dividir en:

- 1.- Pérdidas aparentes: Son volúmenes de agua consumida que no son contabilizados por la empresa hidrológica. Esto es debido a volúmenes no medidos por deficiencia en los equipos, robos u otro uso ilegal del agua.
- 2.- Pérdidas reales: Estas pérdidas, generalmente se les llama fugas. Están constituidas por el volumen que sale del sistema a través de los defectos o roturas en las tuberías y sus accesorios.

Las fugas mayores, debidas a grandes defectos, son fácilmente detectables mientras que las de bajo caudal tienen una localización más compleja. Así mismo, las pérdidas reales generalmente representan el mayor porcentaje de las fugas presentes en la red.

A su vez, estas pérdidas reales, generalmente se pueden clasificar como (Salguero, 2011):

- a) Pérdidas reportadas o “visibles”: Son de gran caudal y corta duración. El agua aparece rápidamente en la superficie, dependiendo de la presión del agua y del tamaño de la fuga. Las pérdidas reportadas son atendidas en un periodo corto de tiempo. Son fugas fáciles de detectar y se localizan mediante inspecciones simples a la red.
- b) Pérdidas no reportadas: Estas fugas tienen un caudal y una duración que depende de los programas de control de fugas de la empresa sanitaria, pero no aparecen en la superficie por condiciones desfavorables.

c) Pérdidas de fondo: Son de bajo caudal y larga duración.

Como se puede apreciar, la cantidad de agua que se pierde es prácticamente imposible y económicamente inviable de conocer con exactitud; sin embargo, existen algunas opciones para estimar dicho volumen de pérdidas.

6.1 Balance de agua

Bajo esta metodología, se trata de clasificar cada uno de los consumos que pueda tener una red y los resume en un formato estandarizado presentado por la IWA (Thornton et al., 2008). En la imagen siguiente se puede apreciar cada uno de los componentes de dicho balance.

Volumen entrante al sistema	Consumos autorizados	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado y medido	Volumen facturado
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo no facturado medido	Volumen no facturado
			Consumo no facturado no medido	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	
			Errores de medición y de manejo de información	
		Pérdidas reales	Fugas en conducción y/o distribución	
			Fugas en tanques de almacenamiento	
Fugas en acometidas				

Ilustración 62. Componentes del balance de agua

Cada uno de los ítems puede definirse como (Thornton et al., 2008):

- Volumen entrante al sistema: comprende el agua que proviene de recursos propios de la compañía y el agua que se importa para completar la demanda requerida.

- Consumos autorizados: corresponde al volumen medido o no medido de agua que es entregado a los usuarios registrados, a la propia empresa, o a otros agentes que implícita o explícitamente han sido autorizados para hacer uso del agua que proporciona la compañía. Se incluye en este ítem el agua utilizada en hidrantes contra incendios, limpieza de calles, jardines municipales, fuentes públicas, entre otros usos.
- Pérdidas de agua: aquí se aglutinan las fugas reales y las fugas aparentes. Comprende el volumen de agua que se pierde por fallas en la red de suministro y aquellos conceptos que no corresponden a una pérdida física de agua.
- Consumo autorizado facturado: es cualquier consumo que es autorizado y facturado por la empresa; puede incluir servicios que cuentan con medición o servicios sin medición. Este ítem comprende el consumo facturado medido y el consumo facturado no medido.
- Consumo autorizado no facturado: son consumos que, aunque directamente no representan ingresos para la empresa al no ser facturados, son autorizados por la misma; estos pueden contemplar el propio consumo de la compañía, concesiones a otras empresas o usuarios, etc.
- Pérdidas aparentes: son producidas por inexactitudes en cuestiones de medición de consumos, errores de datos en medición y facturación, además de los consumos no autorizados.
- Pérdidas reales: son las pérdidas físicas debido a fallos en el sistema de suministro de agua potable.
- Consumo facturado y medido: es aquel consumo que pasa por un sistema de micro medición y que entra dentro del sistema de facturación de la compañía.
- Consumo facturado y no medido: es aquel consumo que entra en el sistema de facturación de la compañía, pero que no es medido; es estimado o calculado de acuerdo con algún criterio.
- Consumo no facturado medido: es cuantificado por medio de micro medición y no es facturado.
- Consumo no facturado no medido: Forma parte del consumo autorizado, aunque no es ni medido ni representa un beneficio económico directo para la compañía. Este concepto, generalmente, incluye el consumo de hidrantes contra incendios, lavado de tuberías, entre otros.

- Consumo no autorizado: Incluye los usos ilegales de hidrantes contra incendios, tomas no autorizadas, entre otros.
- Errores de medición: son las pérdidas aparentes de agua causadas en el registro de medidores de agua de cliente.
- Volumen facturado: Volumen de agua que se entrega a los usuarios y que es representado en facturas.
- Volumen no facturado: Volumen de agua que no representa ningún beneficio económico a la empresa.

6.2 Metodología *burst and background estimates* (BABE)

Esta metodología fue desarrollada por Allan Lamber para la *UK National Leakage Control Initiative* (Samir et al., 2017), y en la cual reconoce que el volumen anual de pérdidas está compuesto por numerosos eventos de fuga y que cada uno de ellos individualmente está influenciado por el caudal, y la duración de esta hasta su reparación.

En este tipo de metodología, las pérdidas en general están compuestas por tres elementos:

- 1.- Fugas reportadas: Las cuales tienen típicamente grandes caudales, por lo que en corto espacio de tiempo son reparadas, ya que su existencia es evidente.
- 2.- Fugas no reportadas: poseen un caudal moderado, y solo son detectadas por las campañas de detección de fugas que realice la compañía operadora.
- 3.- Fugas de fondo: Son las de menor dimensión por separado, y se producen generalmente en las juntas o en pequeñas fisuras. Por su dimensión tan pequeña es prácticamente imposible detectarlas; sin embargo, pese a su dimensión muy pequeña, en global son las que pueden tener mayor impacto en la red.

Los conceptos BABE pueden ser utilizados para determinar los componentes de las fugas reales anuales, o los componentes de los flujos nocturnos.

6.3 Métodos de estimación global

En la determinación del nivel de fugas en una red, las empresas de distribución de agua suelen recurrir a dos métodos de estimación de fugas principalmente

- Método *top-down*: Evalúa las pérdidas por medio de un balance hídrico, de arriba hacia abajo. Se determina el volumen de agua que entra al sistema y se le sustrae del valor consumido. En este método se hacen suposiciones para determinar las pérdidas aparentes y por diferencia se obtienen las pérdidas reales.
- Método *bottom-up*: Se conoce también como método de la evaluación de las fugas mínimas nocturnas. En este caso, el nivel actual de fugas se estima partiendo del flujo mínimo nocturno; a este valor se le debe restar el consumo real nocturno, el cual equivale a la parte del flujo mínimo nocturno que es efectivamente consumida por los usuarios.

6.4 Cálculo por fuga

La modelación de las fugas durante mucho tiempo se realizó con base a la ecuación de flujo a través de un orificio de área constante, según se muestra en la ecuación siguiente:

$$Q_f = C_d A_f \sqrt{2gh}, \quad (46)$$

donde Q_f es el caudal en fuga, C_d es el coeficiente de descarga, A_f es área del orificio, g es gravedad, h es la presión.

Sin embargo, May (1994) presentó un concepto denominado FAVAD (*Fixed And Variable Area Discharged paths*), donde determinó que el área transversal de la fuga puede variar con la presión, quedando expresada de la siguiente forma:

$$Q_f = k_f P^e, \quad (47)$$

donde, k_f es el coeficiente de fuga, P es la presión estática y e es el exponente de fuga.

Así mismo, May indicó que el flujo de la fuga es equivalente a la velocidad multiplicada por el área, variando con la presión de la siguiente forma:

- Áreas determinadas, como agujeros en las paredes de tuberías metálicas, el exponente e es 0,5.
- Áreas que varían a lo largo de un eje, como fugas en uniones o accesorios, el exponente e es 1,5.

- Áreas que varían a lo largo de dos ejes, como grietas en tuberías de plástico, el exponente e es 2,5.

6.5 Uso de válvulas reductoras de presión para la reducción de fugas en sectores

Si bien el modelo matemático desarrollado hasta el momento proporciona los modelos de sectorización más económicos en función de la capacidad de trabajo deseada, no permiten hacer un control de la presión que genere a su vez una disminución en las fugas que existan en la red.

Así pues, se propone la incorporación de válvulas reductoras de presión a ser instaladas en la entrada de los sectores, con la finalidad de hacer un control activo de las presiones y disminuir el volumen de fugas que pueda existir.

La calibración de dichas válvulas se realizará para un periodo de 24 horas y se obtendrán los valores de tarado con el empleo de un proceso de optimización por PSO. Este proceso de optimización tratará de minimizar las fugas garantizando el sostenimiento de la capacidad previamente establecido para cada uno de los sectores. En el pseudo código mostrado en la imagen 63 se muestra el procedimiento propuesto.

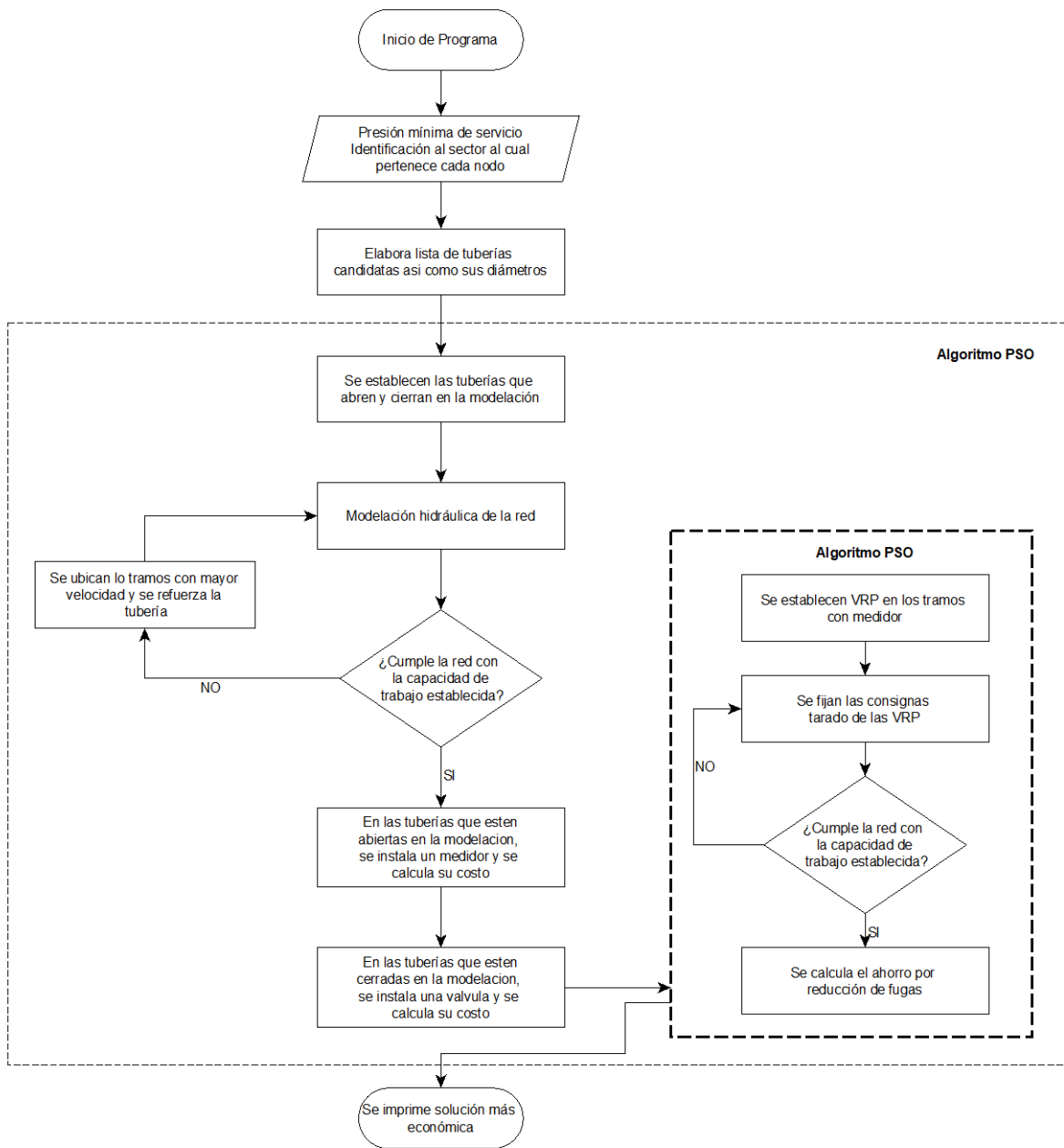


Ilustración 63. Pseudo código para la optimización económica incluyendo calibración de válvulas

Para la calibración de los coeficientes de fugas, fue utilizado el procedimiento empleado por Cobacho et al., (2015). En dicho procedimiento se toma el valor de fuga total conocida de la red y es distribuida de forma espacial en todos los tramos. Asumiendo que las fugas están repartidas de forma similar en todos los tramos, por la red ser homogénea, entonces la longitud equivalente de fugas adscrita a un nodo será el equivalente a la mitad de la sumatoria de todas las tuberías que confluyen en él.

Posteriormente, ese valor es normalizado en cada nodo, Γ_{nodo} , dividiendo la longitud equivalente de cada nodo $L_{Equiv.nodo}$ entre la longitud total de tramos de la red $Long_{tramos}$, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Gamma_{nodo} = \frac{L_{Equiv.nodo}}{\sum Long_{tramos}} \quad . \quad (48)$$

Posteriormente, se calibra el coeficiente de fuga mediante un proceso iterativo. En un primer instante se calcula un coeficiente de fuga para toda la red, solo para la primera iteración, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$K_{net} = \frac{Q_{fugas\ real}}{\bar{P}_{net}} \quad , \quad (49)$$

donde, K_{net} es el coeficiente de fugas de la red para la primera iteración, $Q_{fugas\ real}$ es el valor de fugas totales conocidas de la red y \bar{P}_{net} es la presión promedio de los nodos.

Posteriormente, se calcula el coeficiente de fuga para cada nodo, que no es mas que el producto del coeficiente de fugas de la red por el valor normado de la longitud equivalente de fugas Γ , tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$K_{nodo} = K_{net} * \Gamma_{nodo}$$

A seguir, se modela la red por 24 horas, se calcula el volumen total fugado y se compara con el valor conocido. Si no cumple con un margen de error dispuesto, se recalcula K_{net} y se repite el procedimiento hasta coincidir.

En cuanto a la curva de demanda establecida para las modelaciones en periodo extendido, se usó la mostrada en la tabla 25.

Tabla 25. Curva de Consumos

Curva de consumos			
Horas	Factor	Horas	Factor
0	0,4	12	1,25
1	0,4	13	1,22
2	0,4	14	1,25
3	0,4	15	1,3
4	0,5	16	1,5
5	0,7	17	1,4
6	1,3	18	1,2
7	2	19	0,9
8	1,7	20	0,6
9	1,5	21	0,5
10	1,4	22	0,45
11	1,3	23	0,4

Como resultado se obtiene una reducción del 30,39 % en las fugas con una configuración de tarado de cada una de las válvulas, tal y como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Tarada de válvulas para red de Balerna

HORAS	TARADO DE VÁLVULAS								
	VRP 1	VRP 2	VRP 3	VRP 4	VRP 5	VRP 6	VRP 7	VRP 8	VRP 9
1	18,08	86,10	12,52	38,31	10,00	16,27	12,63	10,76	16,51
2	18,08	80,96	12,52	38,31	10,00	18,62	12,63	10,76	16,60
3	18,08	99,92	12,52	38,31	10,00	67,14	12,63	10,76	10,96
4	18,08	66,00	12,52	38,31	10,00	12,09	12,63	10,76	16,51
5	18,29	74,59	13,07	38,63	10,00	10,26	12,80	11,03	14,50
6	18,88	99,57	14,39	39,39	10,00	16,70	13,21	11,68	12,70
7	21,99	76,39	19,91	42,61	10,00	76,26	14,99	14,40	15,34
8	30,51	40,69	32,08	48,05	17,07	10,39	18,05	19,37	26,83
9	24,98	94,32	27,92	45,51	13,36	74,35	16,62	16,85	22,29
10	23,46	67,01	23,07	43,99	11,56	77,56	15,76	15,57	17,97
11	22,71	99,98	21,29	43,28	10,73	66,45	15,37	14,97	91,54
12	21,99	99,88	19,91	42,61	10,00	19,29	14,99	14,40	15,34
13	21,65	87,80	19,36	42,29	10,00	72,63	14,81	14,13	14,95
14	21,45	43,05	19,04	42,10	10,00	47,75	14,71	13,97	14,73
15	21,65	82,95	19,36	42,29	10,00	60,69	14,81	14,13	14,95
16	21,99	98,71	19,91	42,61	91,74	53,08	15,00	14,40	15,34
17	23,52	56,37	22,77	43,99	11,56	25,55	15,76	15,57	17,93
18	22,72	86,39	21,29	43,28	10,73	10,00	15,37	14,97	16,19
19	21,32	99,14	18,83	41,98	10,00	10,29	14,64	13,87	98,80
20	19,69	58,04	15,98	40,31	10,00	10,10	13,71	12,45	13,07
21	18,56	75,67	13,70	38,99	10,00	59,29	12,99	11,34	12,62
22	18,29	90,35	13,07	38,63	10,00	22,85	12,80	11,03	14,00
23	18,18	95,49	12,79	38,46	10,00	15,37	12,71	10,89	10,40
24	18,08	61,16	12,52	38,31	10,00	44,18	12,63	10,76	10,23

7. APLICACIÓN A LA RED DE CORO, ESTADO FALCÓN, VENEZUELA

7. APLICACIÓN A LA RED DE CORO, ESTADO FALCÓN, VENEZUELA

La ciudad de Santa Ana de Coro es la capital del estado Falcón, en Venezuela. Fue fundada en 1527, siendo la primera capital del país. Es un centro urbano mayoritariamente residencial, que en 1993 fue declarada patrimonio mundial de la humanidad por la UNESCO. Actualmente cuenta con 211.537 habitantes sobre una superficie de 1.805 km² (Gobernación del estado Falcón, 2016).

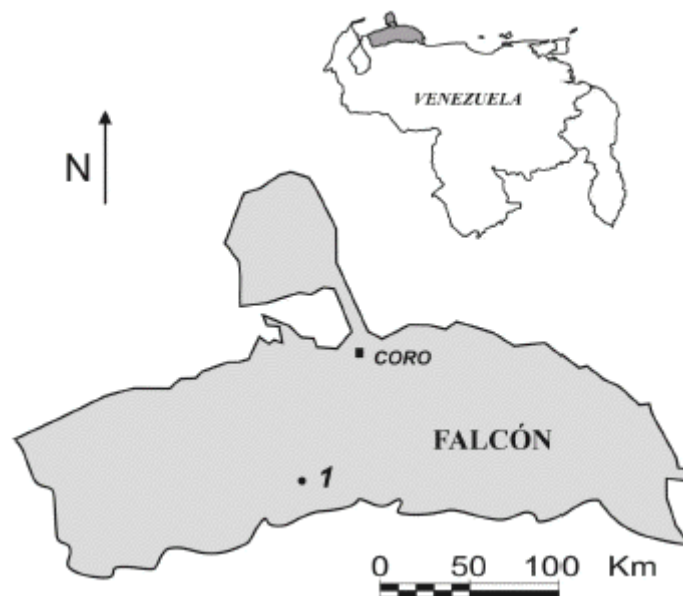


Ilustración 64. Mapa de ubicación de Coro

Esta ciudad se asienta sobre una planicie costera de origen aluvial, con temperaturas que oscilan desde los 23°C hasta máximas que alcanzan 41°C; no superando el promedio anual de lluvias los 550mm, razón por la cual las condiciones climáticas son propias de regiones costeras semi áridas (Rey et al., 2009).

La red de abastecimiento simplificada de la zona norte de la ciudad de Coro puede apreciarse en la imagen 65. Dicha red está constituida por 2 tanques de almacenamiento donde el suministro a la red es por gravedad. Tiene un total de 340 kilómetros de tuberías, conformadas por diferentes diámetros y materiales, así como 2887 nodos de consumo. A lo

largo de los años ha requerido de ampliaciones sucesivas, por lo que su operación se ha dificultado.



Ilustración 65. Red de abastecimiento de Coro

Para la modelación de la red de Coro, se decidió aplicar únicamente el algoritmo de Leiden, ya que, en las pruebas realizadas en las redes anteriores, resultó consistente que la mejor solución era aportada por este. Siendo así, el modelo matemático desarrollado, basado en el algoritmo de Leiden fue probado con la red en cuestión. Como peso en las aristas, se definió el caudal circulante bajo la hipótesis de trabajar a 105 % de su capacidad, de lo cual se obtuvo una configuración de 22 sectores hidrométricos, según puede apreciarse en la ilustración 66.

Así mismo, fue modelada la red aplicando el peso 2 en las aristas, obteniéndose la configuración que se aprecia en la ilustración 67, donde se puede apreciar que la cantidad de sectores es mayor a la obtenida con el peso 1.

Sectores

- 1 ● 12
- 2 ● 13
- 3 ● 14
- 4 ● 15
- 5 ● 16
- 6 ● 17
- 7 ● 18
- 8 ● 19
- 9 ● 20
- 10 ● 21
- 11 ● 22

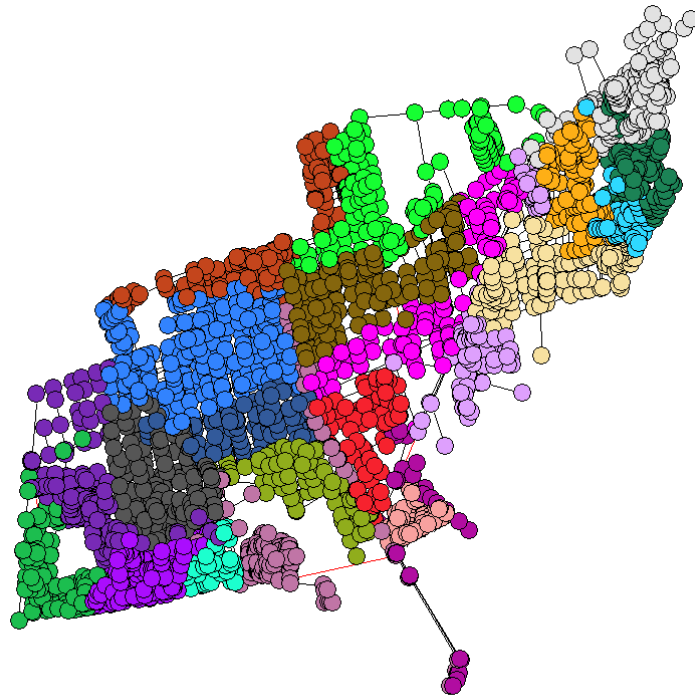


Ilustración 66. Red de Coro sectorizada con peso 1 en las aristas

Sectores

- 1 ● 16
- 2 ● 17
- 3 ● 18
- 4 ● 19
- 5 ● 20
- 6 ● 21
- 7 ● 22
- 8 ● 23
- 9 ● 24
- 10 ● 25
- 11 ● 26
- 12 ● 27
- 13 ● 28
- 14 ● 29
- 15 ● 30

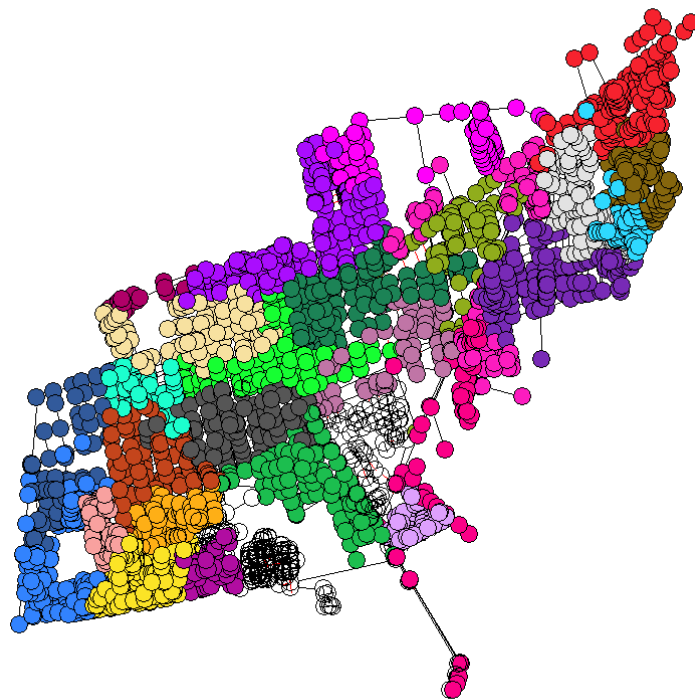


Ilustración 67. Red de Coro sectorizada con peso 2 en las aristas

La configuración de la red de Coro sectorizada con el peso 3 en las aristas, puede observarse en la imagen 68.

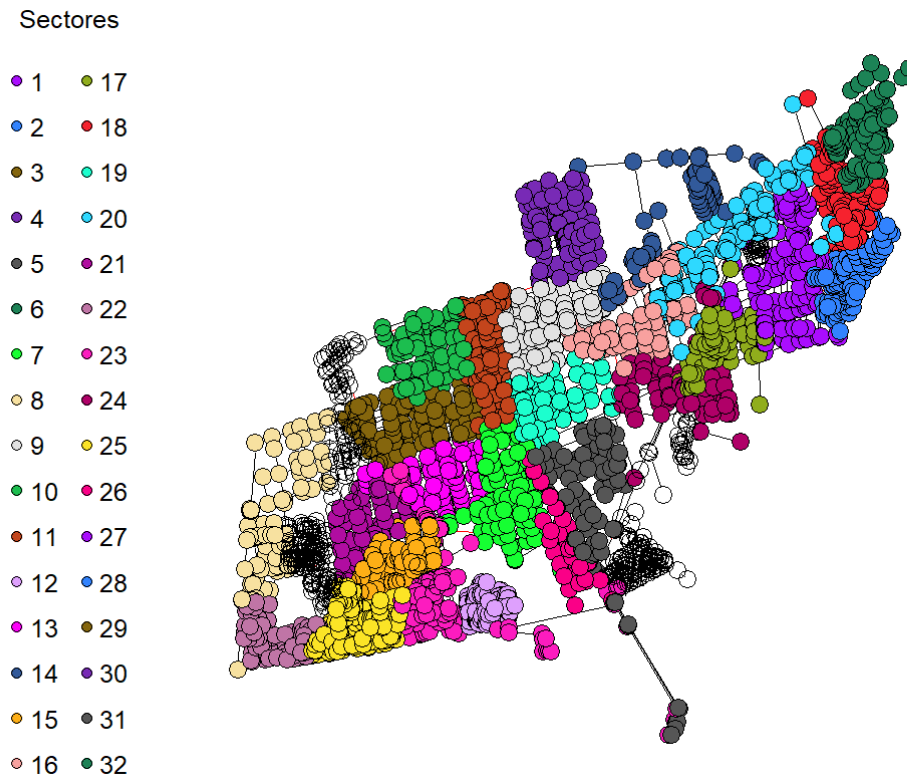


Ilustración 68. Red de Coro sectorizada con peso 3 en las aristas

Puede apreciarse que la solución aportada, incrementa aún más el número de sectores presentes en la red. En este orden de ideas, se modeló la red nuevamente, esta vez incorporando el peso 4 en las aristas, tal y como se muestra en la imagen 69; donde se valora que la configuración aportada consta de 31 sectores.

Por último, se probó generar la sectorización sin pesos en las aristas, esto para poder conocer, si para la red en estudio, el peso en las aristas tiene alguna influencia preponderante. El resultado se puede apreciar en la imagen 70.

Sectores

- 1 ● 17
- 2 ● 18
- 3 ● 19
- 4 ● 20
- 5 ● 21
- 6 ● 22
- 7 ● 23
- 8 ● 24
- 9 ● 25
- 10 ● 26
- 11 ● 27
- 12 ● 28
- 13 ● 29
- 14 ● 30
- 15 ● 31
- 16

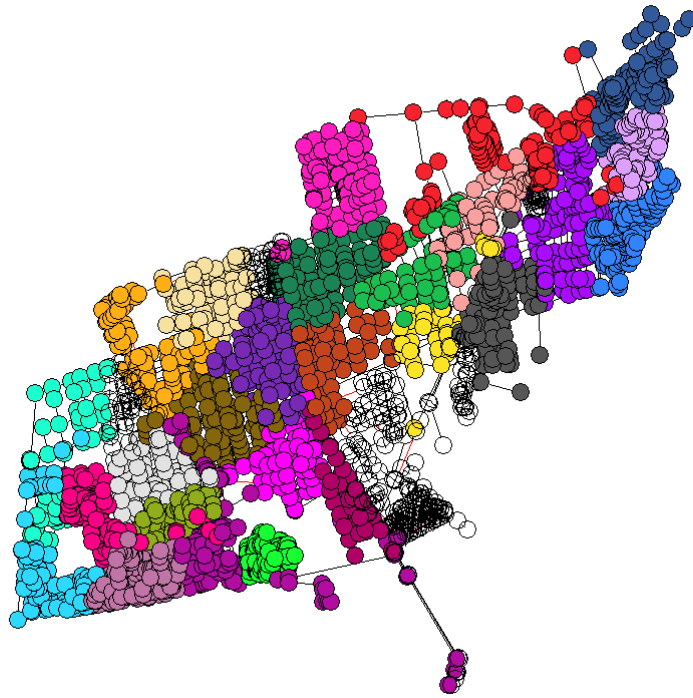


Ilustración 69. Red de Coro sectorizada con peso 4 en las aristas

Sectores

- 1 ● 17
- 2 ● 18
- 3 ● 19
- 4 ● 20
- 5 ● 21
- 6 ● 22
- 7 ● 23
- 8 ● 24
- 9 ● 25
- 10 ● 26
- 11 ● 27
- 12 ● 28
- 13 ● 29
- 14 ● 30
- 15 ● 31
- 16 ● 32

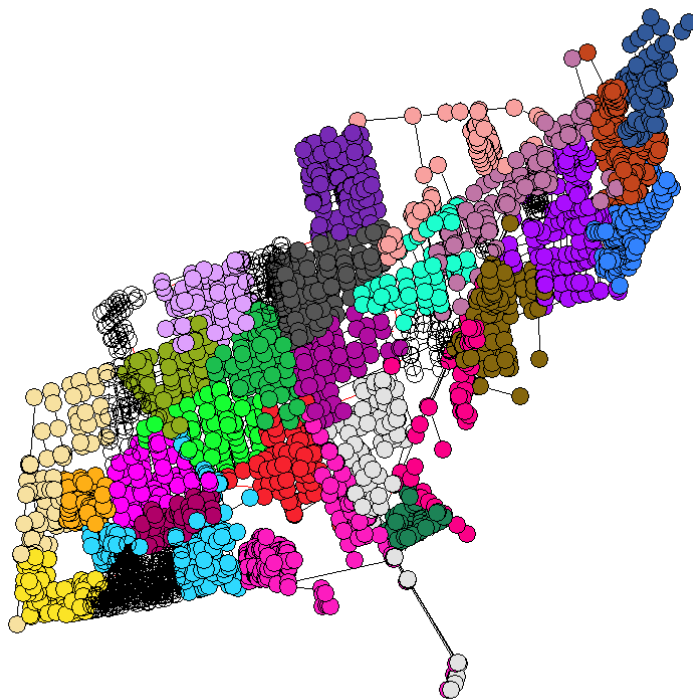


Ilustración 70. Red de Coro sectorizada con peso nulo en las aristas

La comparación entre las soluciones obtenidas podemos apreciarla en la tabla siguiente:

Tabla 27. Costos de implementación en la red de Coro

Peso en aristas	Costo solución UM
Peso 1	418.600
Peso 2	523.850
Peso 3	496.210
Peso 4	504.250
Peso nulo	470.420

Se puede ver como el peso 1 en las aristas es la solución más económica para la sectorización de la red de la ciudad de Coro. Así mismo, para esa solución óptima, en la calibración de las válvulas, se asumió el patrón de consumo expresado en la tabla 25, obteniéndose la configuración del tarado de válvulas expresados en la tabla 27 y la tabla 28.

El volumen total entrante a la red es de 35054 m³/día, y se tiene que el volumen de pérdidas es de 46.85% del total de caudal entrante a la red; con la configuración obtenida de 24 válvulas y en base al tarado horario se logra una reducción del 30,5%, solo con el control de presiones horarias, pasando de 16422 m³ a 11435 m³, logrando disminuir las pérdidas generales hasta un 33%.

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos, se generó una nueva calibración, pero esta vez usando un algoritmo de colonia de hormigas. Partiendo de la fortaleza de este método para lograr soluciones en problemas de optimización combinatoria, la analogía usada fue que cada hormiga representa una solución en cuanto a la configuración o tarado que debe tener cada una de las 24 válvulas. Para la configuración inicial del algoritmo se estableció una población inicial de 10 hormigas y se realizaron 200 iteraciones.

El tarado obtenido mediante el algoritmo ACO, de las 24 válvulas rompe carga se muestra en las tablas 29 y 30.

Tabla 28. Tarado de válvulas 1 a 12 para la red de Coro

HORAS	TARADO DE VÁLVULAS											
	VRP 1	VRP 2	VRP 3	VRP 4	VRP 5	VRP 6	VRP 7	VRP 8	VRP 9	VRP 10	VRP 11	VRP 12
1	30,78	60,03	31,16	44,63	82,94	10,34	38,81	35,45	80,09	12,18	57,09	10,48
2	30,78	46,62	10,01	64,32	10,08	10,20	38,81	35,62	42,16	99,41	99,40	94,25
3	30,78	60,89	66,25	25,39	10,08	10,14	38,81	35,58	23,01	12,18	93,53	10,46
4	30,78	46,62	10,01	64,22	10,08	10,20	38,81	35,62	42,16	99,41	99,40	94,25
5	30,92	26,65	13,52	30,13	10,08	10,46	38,99	36,12	19,68	12,68	43,42	10,55
6	31,28	16,90	14,96	96,90	10,14	10,27	39,87	36,58	11,62	13,82	66,17	10,90
7	33,54	12,88	84,34	78,06	10,24	10,73	42,04	38,81	95,45	18,46	40,61	11,68
8	35,55	98,87	76,60	99,68	10,45	13,92	92,94	42,82	50,98	25,59	81,63	12,89
9	33,42	41,61	23,91	80,05	10,37	10,81	76,51	41,87	37,24	22,17	40,81	12,25
10	32,92	50,66	52,40	98,22	10,35	10,84	47,68	39,76	93,52	20,14	94,05	11,96
11	34,02	95,42	33,54	84,31	10,27	11,06	42,44	39,94	50,62	19,21	86,05	11,77
12	32,41	86,03	98,99	95,97	10,27	10,04	44,73	38,95	97,38	18,29	48,78	86,63
13	32,30	79,04	73,10	89,41	10,24	10,53	42,23	39,01	15,51	17,88	80,58	11,50
14	32,32	80,32	22,02	54,79	10,63	10,63	41,80	39,16	20,44	17,67	55,60	11,43
15	80,60	23,90	66,02	43,15	10,26	99,27	41,10	38,70	21,30	17,86	83,31	11,46
16	33,28	78,87	87,99	18,35	10,29	10,65	96,59	39,12	39,03	18,36	99,03	11,59
17	32,89	41,65	36,37	22,91	10,31	11,07	82,26	40,26	34,87	20,14	50,64	11,91
18	68,51	30,50	74,95	89,42	10,27	16,78	41,68	80,65	10,16	19,20	94,13	11,71
19	33,04	98,25	52,82	21,79	10,22	10,56	41,73	38,54	98,45	17,44	76,94	11,40
20	31,59	99,84	97,04	16,67	10,17	13,23	99,01	39,17	10,00	15,14	40,44	84,98
21	31,07	26,13	99,78	15,84	10,10	10,25	100,00	36,05	98,33	13,23	40,30	10,62
22	30,93	82,85	10,82	78,93	10,08	10,21	39,18	35,72	99,34	12,68	90,58	97,16
23	30,84	10,06	99,55	52,88	10,08	10,16	38,98	35,72	37,87	12,42	45,32	10,91
24	30,78	10,00	45,28	15,41	10,09	17,99	99,86	89,61	70,05	12,18	40,23	10,45

El algoritmo ACO logra un valor de disminución con la implementación del tarado de 30,4%, el cual es similar al obtenido por el algoritmo PSO, con lo cual se comprueba que ambos algoritmos logran cumplir su cometido de generar soluciones para la configuración de las válvulas de entrada en los sectores.

Tabla 29. Tarado de válvulas 13 - 24 para la red de Coro

HORAS	TARADO DE VÁLVULAS											
	VRP 13	VRP 14	VRP 15	VRP 16	VRP 17	VRP 18	VRP 19	VRP 20	VRP 21	VRP 22	VRP 23	VRP 24
1	30,78	60,03	31,16	44,63	82,94	10,34	38,81	35,45	80,09	12,18	57,09	10,48
2	30,78	46,62	10,01	64,32	10,08	10,20	38,81	35,62	42,16	99,41	99,40	94,25
3	30,78	60,89	66,25	25,39	10,08	10,14	38,81	35,58	23,01	12,18	93,53	10,46
4	30,78	46,62	10,01	64,22	10,08	10,20	38,81	35,62	42,16	99,41	99,40	94,25
5	30,92	26,65	13,52	30,13	10,08	10,46	38,99	36,12	19,68	12,68	43,42	10,55
6	31,28	16,90	14,96	96,90	10,14	10,27	39,87	36,58	11,62	13,82	66,17	10,90
7	33,54	12,88	84,34	78,06	10,24	10,73	42,04	38,81	95,45	18,46	40,61	11,68
8	35,55	98,87	76,60	99,68	10,45	13,92	92,94	42,82	50,98	25,59	81,63	12,89
9	33,42	41,61	23,91	80,05	10,37	10,81	76,51	41,87	37,24	22,17	40,81	12,25
10	32,92	50,66	52,40	98,22	10,35	10,84	47,68	39,76	93,52	20,14	94,05	11,96
11	34,02	95,42	33,54	84,31	10,27	11,06	42,44	39,94	50,62	19,21	86,05	11,77
12	32,41	86,03	98,99	95,97	10,27	10,04	44,73	38,95	97,38	18,29	48,78	86,63
13	32,30	79,04	73,10	89,41	10,24	10,53	42,23	39,01	15,51	17,88	80,58	11,50
14	32,32	80,32	22,02	54,79	10,63	10,63	41,80	39,16	20,44	17,67	55,60	11,43
15	80,60	23,90	66,02	43,15	10,26	99,27	41,10	38,70	21,30	17,86	83,31	11,46
16	33,28	78,87	87,99	18,35	10,29	10,65	96,59	39,12	39,03	18,36	99,03	11,59
17	32,89	41,65	36,37	22,91	10,31	11,07	82,26	40,26	34,87	20,14	50,64	11,91
18	68,51	30,50	74,95	89,42	10,27	16,78	41,68	80,65	10,16	19,20	94,13	11,71
19	33,04	98,25	52,82	21,79	10,22	10,56	41,73	38,54	98,45	17,44	76,94	11,40
20	31,59	99,84	97,04	16,67	10,17	13,23	99,01	39,17	10,00	15,14	40,44	84,98
21	31,07	26,13	99,78	15,84	10,10	10,25	100,00	36,05	98,33	13,23	40,30	10,62
22	30,93	82,85	10,82	78,93	10,08	10,21	39,18	35,72	99,34	12,68	90,58	97,16
23	30,84	10,06	99,55	52,88	10,08	10,16	38,98	35,72	37,87	12,42	45,32	10,91
24	30,78	10,00	45,28	15,41	10,09	17,99	99,86	89,61	70,05	12,18	40,23	10,45

Tabla 30. Tarado de válvulas 1 - 12 para la red de Coro por ACO

HORAS	TARADO DE VÁLVULAS											
	VRP 1	VRP 2	VRP 3	VRP 4	VRP 5	VRP 6	VRP 7	VRP 8	VRP 9	VRP 10	VRP 11	VRP 12
1	31,26	100,00	37,31	100,00	10,23	10,17	38,34	35,58	21,91	12,20	40,27	10,58
2	30,94	93,07	26,68	93,91	11,13	11,82	38,95	35,59	34,29	12,56	79,65	87,12
3	30,89	39,67	10,00	89,19	10,14	10,16	38,83	35,83	22,72	12,26	40,52	10,76
4	93,06	10,47	12,64	97,35	10,13	10,17	38,45	35,62	10,00	12,18	100,00	10,46
5	30,92	31,20	10,00	97,51	10,31	10,23	39,20	36,32	10,05	12,74	84,00	10,69
6	31,24	67,00	91,63	98,34	10,12	10,34	39,87	36,38	100,00	13,85	69,93	10,74
7	33,37	84,78	19,32	96,72	11,17	11,68	42,74	39,02	98,54	18,77	96,26	11,69
8	35,97	56,54	95,33	100,00	11,23	11,43	100,00	42,98	100,00	25,97	99,54	13,26
9	33,40	100,00	81,47	62,46	10,36	10,99	100,00	40,88	49,45	22,17	99,82	12,34
10	33,59	75,74	85,67	67,39	12,28	12,05	95,90	41,39	57,91	20,74	98,67	16,56
11	32,73	96,53	29,06	74,63	10,44	15,50	97,20	96,72	10,01	19,38	40,95	12,29
12	77,10	99,84	96,23	98,55	10,37	11,20	41,37	39,18	99,27	18,40	98,87	11,96
13	33,09	52,80	100,00	91,94	11,10	10,29	42,80	38,96	98,94	18,20	55,63	12,00
14	99,69	100,00	30,01	98,98	10,67	11,08	42,06	39,55	13,69	17,89	84,67	12,23
15	33,27	100,00	10,01	63,61	10,26	10,08	41,90	100,00	100,00	17,88	98,99	11,50
16	94,07	33,49	24,05	75,63	10,27	10,63	40,91	39,13	10,00	18,30	100,00	11,57
17	34,54	83,86	81,93	99,91	10,30	10,77	43,00	40,05	74,49	20,28	99,93	11,90
18	34,04	97,63	10,06	54,35	10,27	44,46	42,41	36,16	98,93	19,19	81,64	11,79
19	95,79	83,53	76,14	99,33	10,24	37,77	40,88	35,79	88,53	17,44	40,60	11,43
20	31,64	95,58	92,84	99,97	10,25	10,48	40,63	37,38	33,65	15,15	99,99	11,06
21	31,07	100,00	95,54	82,11	10,10	10,21	39,47	36,23	85,17	13,23	99,31	10,64
22	30,99	75,71	33,92	90,02	10,15	10,32	39,17	36,42	10,02	12,69	40,44	10,61
23	32,76	97,28	27,17	98,60	10,28	10,45	38,53	35,92	10,00	12,46	100,00	10,68
24	100,00	12,42	99,71	49,11	10,20	11,15	38,57	35,28	80,53	12,22	100,00	10,59

Tabla 31. Tarado de válvulas 13 - 24 para la red de Coro por ACO

HORAS	TARADO DE VÁLVULAS											
	VRP 13	VRP 14	VRP 15	VRP 16	VRP 17	VRP 18	VRP 19	VRP 20	VRP 21	VRP 22	VRP 23	VRP 24
1	99,95	55,76	10,62	15,89	80,64	10,35	29,50	10,05	85,94	99,87	10,53	10,39
2	41,21	64,37	10,95	10,66	94,91	11,84	100,00	76,29	64,01	99,99	10,99	13,08
3	99,95	94,66	10,55	10,66	91,39	10,31	99,94	12,31	78,38	97,78	10,64	12,46
4	40,49	100,00	10,59	10,59	100,00	89,71	100,00	97,47	100,00	94,37	10,54	12,69
5	40,56	46,22	10,90	10,99	96,43	10,34	95,25	13,12	20,93	99,83	10,74	12,88
6	40,65	96,57	10,94	20,35	67,44	99,90	89,83	100,00	99,76	97,06	10,94	11,44
7	41,30	92,95	12,33	99,36	86,86	11,70	96,18	70,48	99,99	100,00	12,58	10,13
8	42,17	99,95	100,00	14,25	64,69	16,26	98,00	100,00	97,63	100,00	14,32	27,52
9	41,51	100,00	12,93	44,11	99,85	11,51	64,15	98,52	51,01	97,94	12,90	10,01
10	44,50	100,00	13,94	13,24	76,28	17,34	98,93	82,13	23,68	100,00	12,90	21,84
11	98,33	99,99	12,38	35,48	96,70	12,02	100,00	89,41	40,46	70,61	12,21	11,19
12	42,09	100,00	12,06	12,36	47,49	11,66	17,60	97,90	84,68	91,97	11,98	19,22
13	41,96	14,93	100,00	12,44	100,00	13,61	44,87	41,64	81,00	44,21	12,20	18,92
14	41,49	11,02	12,36	12,25	100,00	11,03	99,49	100,00	97,92	17,59	11,91	18,62
15	41,05	10,71	11,90	11,98	98,80	10,98	91,89	91,16	62,74	53,91	99,96	18,82
16	41,10	100,00	100,00	32,87	99,93	11,02	17,18	10,00	84,94	19,84	12,00	10,00
17	100,00	92,48	100,00	37,89	100,00	11,23	81,03	92,09	92,05	99,97	12,42	12,29
18	41,19	98,18	12,21	12,30	100,00	11,12	63,32	100,00	100,00	82,74	10,01	20,33
19	99,38	99,97	11,79	30,39	99,42	10,94	16,96	99,91	69,00	97,69	11,07	10,76
20	40,78	100,00	11,30	15,12	100,00	10,74	96,47	67,10	90,21	34,89	11,26	14,59
21	40,54	100,00	99,99	10,83	92,69	10,43	84,52	12,35	41,38	100,00	10,78	13,61
22	98,59	47,28	97,79	10,98	100,00	100,00	88,11	100,00	100,00	13,56	10,75	13,03
23	100,00	95,07	10,59	10,64	95,09	10,36	98,05	10,69	87,71	91,22	10,59	12,73
24	40,85	97,86	10,76	13,31	49,02	10,69	16,00	10,02	40,75	100,00	10,55	11,73

8. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA

8. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA

La existencia de diferentes indicadores que permitan estimar la capacidad de la red hace que, algunas veces, no sea clara la elección del indicador adecuado, debido a que la mayoría de ellos estima la capacidad de forma indirecta por lo cual obtenemos valores abstractos. Esto dificulta interpretar cómo es el funcionamiento general de la red y, además, no aporta información de cómo será el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones de operación y demanda. De ahí que el caudal máximo teórico sea un indicador preponderante ya que, sólo por su simple apreciación, pudiéramos determinar hasta qué punto puede la red suministrar para cumplir con las demandas establecidas bajo diferentes condiciones de servicio. Queda demostrado, así, también, que el caudal máximo teórico tiene una relación directa con el índice de resiliencia, lo cual lo valida como medida indispensable a usar a la hora de sectorizar las redes de distribución de agua potable.

Dentro de los algoritmos usados para la generación de sectores, pudo comprobarse para el caso de las redes estudiadas, que los agrupamientos generados no diferían grandemente entre ellos, generando sus configuraciones con valores de modularidad muy similares; y esto, para todos los pesos estudiados en las aristas. Sin embargo, cuando se incluye dentro del análisis los costos de formación de los sectores, es cuando se aprecian diferencias significativas.

- En primer lugar, se validó que las soluciones con mayor valor de modularidad no son necesariamente las soluciones más económicas. Se observó, además, que, de todos los algoritmos probados, el novel algoritmo de *Leiden* aportó las soluciones más económicas, tanto en el caso de la red de Fossolo como en el caso de la red de Balerna. Hay que destacar, que cuando se busca sectorizar la red para trabajar a mayores capacidades, los resultados óptimos se encuentran en agrupamientos con mayor número de sectores; esto es debido a que, al incrementarse la cantidad de sectores, también se incrementaba la cantidad de espacios de búsqueda del algoritmo

y, por lo tanto, podría haber caminos alternativos para el flujo llegar hasta el mismo punto, garantizando de esta manera la capacidad deseada en la red.

- Con respecto a los pesos usados en cada una de las aristas de la red como elemento para la generación de los sectores, en el caso de la red de Fossolo, resultó más económico el uso de los pesos 3 y 4; esto, por ser una red de pequeño tamaño; sin embargo, para el caso de la red de Balerna (red de tamaño medio) y para la red de Coro (red de mayor tamaño), se obtuvo como resultado que el peso 1, en este caso referente al caudal circulante, fue el que resultó generador de soluciones más económicas.
- A nivel de complejidad de escalabilidad y aplicación de la metodología, no hay impacto resaltante ya que con solo poseer el fichero inp podía esta ser aplicada. Ahora bien, en cuanto al tiempo de cómputo, a medida que se incrementa el tamaño de la red también se incrementaba el tiempo en la aplicación de la metodología, para el caso de la red de Fossolo resultó en 129 segundos, para la red de Balerna 32.651 segundos y para la red de Coro 82.657 segundos, todo esto en un computador con procesador Intel Core i5 de octava generación.
- La aplicación de la metodología a la red de abastecimiento de la ciudad de Coro aportó como mejor solución una configuración de 22 sectores y de 24 válvulas rompe carga, con lo cual se logra cumplir con la capacidad requerida para cada uno de los instantes de tiempo. Este resultado, obtenido mediante *particle swarm optimization*, fue contrastado aplicando un algoritmo de colonia de hormigas, mediante el cual se obtuvieron resultados muy similares en cuanto a la configuración de las válvulas rompe carga, como de valores de reducción de las fugas. Esta similitud de resultados proporciona robustez a la metodología descrita.
- Al culminar este trabajo, son varias las líneas de investigación que pudiesen continuarse, destacando entre ellas, que sería interesante incluir la capacidad de la red como elemento a optimizar dentro del propio algoritmo de clústering, ya que, como se expresó anteriormente, el valor de modularidad no genera configuraciones con resultados más económicos; y, en este caso, sería interesante intervenir el algoritmo de *Leiden* para que el valor a optimizar sea la capacidad de la red.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, H., Melo Baptista, J., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., Parena, R., 2006. Performance Indicators for Water Supply Services. Manual of Best Practice., Second Edi. ed. IWA Publishing, London.
- Alonso, C., 2008. Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Valencia.
- Atkinson, S., Farmani, R., Memon, F., Butler, D., 2014. Reliability Indicators for Water Distribution System Design: Comparison. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 140, 160–168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000304)
- Awumah, K., Goulter, I., Bhatt, S., 1990. Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures. *Stoch. Hydrol. Hydraul.* 4, 309–320. <https://doi.org/10.1007/bf01544084>
- Babu, K.S.J., Vijayalakshmi, D., 2013. Self-Adaptive PSO-GA Hybrid Model for Combinatorial Water Distribution Network Design. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 4, 57–67. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000113)
- Bagheri, A., Asgary, A., Levy, J., Rafieian, M., 2006. A performance index for assessing urban water systems: A fuzzy inference approach. *J. AWWA* 98, 84–92.
- Bakri, B., 2014. Study on Water Distribution Network Rehabilitation and Expansion Planning in Developing Countries (Tesis Doctoral). Tokyo Metropolitan University.
- Baños, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C., Márquez, A.L., 2011. Resilience Indexes for Water Distribution Network Design: A Performance Analysis Under Demand Uncertainty. *Water Resour. Manag.* 25, 2351–2366. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9812-3>
- Bi, W., Dandy, G.C., Maier, H.R., 2016. Use of Domain Knowledge to Increase the Convergence Rate of Evolutionary Algorithms for Optimizing the Cost and Resilience of Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 142, 04016027. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000649)

- Blondel, V.D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., Lefebvre, E., 2008. Fast unfolding of communities in large networks. *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 2008, P10008. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>
- Bragalli, C., D Ambrosio, C., Lee, J., Paolo, A., 2008. Water network design by MINLP. *IBM J. Res. Dev.* RC24495.
- Brentan, B., Campbell, E., Goulart, T., Manzi, D., Meirelles, G., Herrera, M., Izquierdo, J., Luvizotto Jr, E., 2018. Social network community detection and hybrid optimization for dividing water supply into district metered areas. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000924)
- Brentan, B.M., Campbell, E., Meirelles, G.L., Luvizotto, E., Izquierdo, J., 2017. Social Network Community Detection for DMA Creation: Criteria Analysis through Multilevel Optimization. *Math. Probl. Eng.* 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/9053238>
- Campbell, E., 2017. Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- Campbell, E., 2013. Propuesta Para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Valencia.
- Campbell, E., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Tavera, M., 2014. Water Supply Network Sectorization Based on Social Networks Community Detection Algorithms. *Procedia Eng.* 89, 1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.251>
- Campbell, E., Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez-García, R., 2016. A Novel Water Supply Network Sectorization Methodology Based on a Complete Economic Analysis, Including Uncertainties. *Water* 8, 179. <https://doi.org/10.3390/w8050179>
- Carpitella, S., Brentan, B., Montalvo, I., Izquierdo, J., Certa, A., 2018. Multi-Objective and Multi-Criteria Analysis for Optimal Pump Scheduling in Water Systems. <https://doi.org/10.29007/vk44>
- Chatzivasili, S., Papadimitriou, K., Kanakoudis, V., Patelis, M., 2018. Optimizing the Formation of DMAs in a Water Distribution Network Applying Geometric Partitioning (GP) and Gaussian Mixture Models (GMMs). *Proceedings* 2, 601.

<https://doi.org/10.3390/proceedings2110601>

- Clauset, A., Newman, M., Moore, C., 2004. Finding community structure in very large networks. *Phys. Rev. E* 70, 066111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.066111>
- Cobacho, R., Arregui, F., Soriano, J., Cabrera, E., 2015. Including leakage in network models: an application to calibrate leak valves in EPANET. *J. Water Supply Res. Technol.* 64, 130–138. <https://doi.org/10.2166/aqua.2014.197>
- Coelho, S.T., 1997. *Performance in water distribution: A systems approach*. Tauton, Somerset, England.
- Colombo, A.F., Karney, B.W., 2002. Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 128, 441–450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:6\(441\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:6(441))
- Creaco, E., Fortunato, A., Franchini, M., Mazzola, M.R., 2014. Comparison between Entropy and Resilience as Indirect Measures of Reliability in the Framework of Water Distribution Network Design. *Procedia Eng.* 70, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.043>
- Creaco, E., Franchini, M., 2014. Low Level Hybrid Procedure for the Multi-objective Design of Water Distribution Networks. *Procedia Eng.* 70, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.042>
- Csardi, G., Nepusz, T., 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal Complex Sy*, 1695.
- Cullinane, J., Lansey, K., Mays, L., 1992. Optimization availability based design of water distribution networks. *J. Hydraul. Eng.* 118, 420–441. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:3\(420\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(420))
- De Paola, F., Fontana, N., Galdiero, E., Giugni, M., Uberti, G., Vitaletti, M., 2014. Optimal Design of District Metered Areas in Water Distribution Networks. *Procedia Eng.* 70, 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.050>
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Di Mauro, A., 2013a. *Water Supply Network District Metering*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Vienna, Vienna.

<https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1493-3>

Di Nardo, A., Di Natale, M., Giudicianni, C., Greco, R., Santonastaso, G.F., 2017. Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning. *Appl. Netw. Sci.* 2, 19. <https://doi.org/10.1007/s41109-017-0033-4>

Di Nardo, A., Di Natale, M., Greco, R., Santonastaso, G., 2014a. Ant Algorithm for Smart Water Network Partitioning. *Procedia Eng.* 70, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.058>

Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., 2014b. Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 140, 620–629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000364)

Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G., Venticinque, S., 2011. Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system, in: *Proceedings of CCWI 2011*. p. 6.

Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F., Tzatchkov, V.G., Alcocer-Yamanaka, V.H., 2013b. Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths. *Water Supply* 13, 951–957. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.059>

Diao, K., Zhou, Y., Rauch, W., 2013. Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 139, 184–190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)

Dias, N., Covas, D., Ramos, H., 2006. Metodología de apoio ao diagnóstico para melhoria de desempenho de sistemas de distribuição de água. *Ing. del Agua* 13, 243–261.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Coloni, A., 1996. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans Syst Man Cybernetics - Part B. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. B. Cybern.* 26, 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>

Farley, M., 2001. Leakage management and control, a best practice training manual. Ginebra, Suiza.

- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z.B., Istandar, A., Singh, S., 2008. The Manager's Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses. United States Agency for International Development (USAID). 1–110.
- Formiga, K., 2005. Otimização Multiobjetivo De Projetos De Redes (Tesis Doctoral). Universidade de Sao Paulo.
- Fortunato, S., 2010. Community detection in graphs. *Phys. Rep.* 486, 75–174.
- Geem, Z.W., 2009. Particle-swarm harmony search for water network design. *Eng. Optim.* 41, 297–311. <https://doi.org/10.1080/03052150802449227>
- Gheisi, A., Forsyth, M., Naser, G., 2016. Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 142, 04016047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000690)
- Giudicianni, C., Herrera, M., di Nardo, A., Adeyeye, K., 2020. Automatic Multiscale Approach for Water Networks Partitioning into Dynamic District Metered Areas. *Water Resour. Manag.* 34, 835–848. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02471-w>
- Gobernación del estado Falcón, 2016. Plan de ordenación del territorio. Estado Falcón. Tomo I. Coro, Venezuela.
- Greco, R., Di Nardo, A., Santonastaso, G., 2012. Resilience and entropy as indices of robustness of water distribution networks. *J. Hydroinformatics* 14, 761–771. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.037>
- Gupta, R., Bhawe, P., 1996. Reliability Based Design of Water Distribution Systems. *J. Environ. Eng.* 122, 51–54.
- Gupta, R., Bhawe, P., 1994. Reliability Analysis of Water Distribution Systems. *J. Environ. Eng.* 120, 447–461.
- Haider, H., Sadiq, R., Tesfamariam, S., 2014. Performance indicators for small- and medium-sized water supply systems: a review. *Environ. Rev.* 22, 1–40. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0013>
- Herrera, A.M., 2011. Improving water network management by efficient division into supply clusters (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.

<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/11233>.

- Ilaya-Ayza, A., 2016. Propuesta para la transición de un sistema con suministro de agua intermitente a suministro continuo (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- Ilaya-Ayza, A., Campbell, E., Pérez-García, R., Izquierdo, J., 2016a. Network Capacity Assessment and Increase in Systems with Intermittent Water Supply. *Water* 8, 126. <https://doi.org/10.3390/w8040126>
- Ilaya-Ayza, A., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Martins, C., Ayala-Cabrera, D., 2016b. La curva de consigna , una herramienta útil para la esqueletización , sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua. *Acta Univ. Multidiscip. Sci. J.* 26, 49–58. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1026>
- Izquierdo, J., Herrera, A.M., Montalvo, I., Pérez-García, R., 2009. Agent-based division of water distribution system into District Metered Areas, in: 4th International Conference, ICSoft. Sofia, Bulgaria, pp. 167–180.
- Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., Fuertes-Miquel, V., 2008. Design optimization of wastewater collection networks by PSO. *Comput. Math. with Appl.* 56, 777–784. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.007>
- Jayaram, N., Srinivasan, K., 2008. Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resour. Res.* 44, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006WR005316>
- Karaa, F., Marks, D., 1990. Performance of water distribution networks: Integrated Approach. *J. Perform. Constr. Facil.* 4, 51–67.
- Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle Swarm Optimization, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, pp. 1942–1945.
- Kolaczyk, E.D., Csárdi, G., 2014. Statistical Analysis of Network Data with R, Use R! Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0983-4>
- Letting, L., Hamam, Y., Abu-Mahfouz, A., 2017. Estimation of Water Demand in Water Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization. *Water* 9, 593. <https://doi.org/10.3390/w9080593>

- Lifshitz, R., Ostfeld, A., 2018. Clustering for Analysis of Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 144, 04018016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000917](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000917)
- Mariappan, M., Geetha, M., Tosun, Ö., 2019. An improved particle swarm optimization algorithm to solve hybrid flowshop scheduling problems with the effect of human factors – A case study. *Comput. Oper. Res.* 114, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104812>
- Martinez, F., Vidal Nadal, R., Andrés Folgado, M., 2009. La regulación de los sistema hidráulicos, in: Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J., Martinez, F. (Eds.), *Ingeniería Hidráulica Aplicada a Los Sistemas de Distribución de Agua. Volumen II.* ITA-Universitat Politècnica de Valencia, Valencia.
- Martins, C., Campbell, E., Ilaya-Ayza, A., Brentan, B., Izquierdo, J., 2017a. Sectorization of Supply Networks Through the Implementation of Self Organized Maps. *SSRN Electron. J.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.3113723>
- Martins, C., Ilaya-Ayza, A., Campbell, E., Izquierdo, J., 2017b. El caudal máximo teórico en redes y su relación con el índice de resiliencia, in: *Congreso de Método Numéricos En Ingeniería.* Valencia, España.
- May, J., 1994. Leakage, pressure and control, in: *Leakage, Pressure and Control. In Proceedings of the BICS International Conference on Leakage Control Investigation in Underground Assets.*
- Meirelles, G., Luvizotto, E., Brentan, B.M., 2017. Selection and location of Pumps as Turbines substituting pressure reducing valves. *Renew. Energy* 109, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.056>
- Metola, D.R., 2009. *Elaboración del modelo matemático de la red de agua potable de Maspalomas (Gran Canaria), y estudio de sectorización de la misma (Tesis de Master).* Universidad Politècnica de Valencia.
- Meza, O., Ortega, M., 2006. *Grafos Y Algoritmos*, 1st ed. Universidad Simón Bolívar.
- Montalvo, I., 2010. *Diseño Óptimo de Sistemas de Distribución de Agua Mediante Particle Swarm.* Universidad Politècnica de Valencia.

- Montalvo, I., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Herrera, M., 2010a. Improved performance of PSO with self-adaptive parameters for computing the optimal design of Water Supply Systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 23, 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.015>
- Montalvo, I., Izquierdo, J., Schwarze, S., Pérez-García, R., 2010b. Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction. *Math. Comput. Model.* 52, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.02.017>
- Morrison, J., 2004a. Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach. *Water* 21 44–46.
- Morrison, J., 2004b. Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach. *Water* 21 44–46.
- Morrison, J., Tooms, S., Rogers, D., 2007. DMA Management Guidance Notes. IWA Publishing.
- Newman, M., 2010. *Networks an Introduction*, 1st ed. Oxford University Press, New York.
- Newman, M., 2006. Modularity and community structure in networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103, 8577–8582.
- Newman, M., Girvan, M., 2004. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E* 69, 15.
- Newman, M.E.J., 2006. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices. *Phys. Rev. E* 74, 036104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036104>
- Ostfeld, A., 2004. Reliability analysis of water distribution systems. *J. Hydroinformatics* 6, 281–294.
- Park, J., Lambert, J., Haines, Y., 1998. Hydraulic power capacity of water distribution networks of deterioration. *Water Resour. Res.* 34, 3605–3614. <https://doi.org/10.1029/98WR01377>
- Perelman, L., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Whittle, A.J., 2015. Automated sub-zoning of water distribution systems. *Environ. Model. Softw.* 65, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>

- Pohl, I., 1969. Bi-Directional and Heuristic search in path problems. Stanford University.
- Pons, P., Latapy, M., 2005. Computing Communities in Large Networks Using Random Walks. pp. 284–293. https://doi.org/10.1007/11569596_31
- Prasad, D., Hong, S.-H., Park, N., 2003. Reliability Based Design of Water Distribution Networks Using Multi-Objective Genetic Algorithms. *KSCE J. Civ. Eng.* 7, 351–361.
- Prasad, D., Park, N.-S., 2004. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 130, 73–82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:1\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(73))
- Reca, J., Martínez, J., 2006. Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. *Water Resour. Res.* 42.
- Rey, O., Martínez, M., Romero, M., Vera, R., Ariza, M., Alezones, R., Gutiérrez, J., 2009. Sedimentología y geoquímica sedimentaria de la formación el paraíso, cuenca de Falcón, Venezuela. *Rev. la Fac. Ing. Univ. Cent. Venez.* 24, 16–26.
- Rosvall, M., Axelsson, D., Bergstrom, C.T., 2009. The map equation. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 178, 13–23. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2010-01179-1>
- Saldarriaga, J., Bohorquez, J., Celeita, D., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Filion, Y., Grayman, W., Kapelan, Z., 2019. Battle of the Water Networks District Metered Areas. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 145, 04019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001035)
- Saldarriaga, J.G., Ochoa, S., Moreno, M.E., Romero, N., Cortés, O.J., 2010. Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water J.* 7, 121–140. <https://doi.org/10.1080/15730620903447621>
- Salguero, F., 2011. Criterios de eficiencia energética y de coste de gestión de fugas como fundamentos para la sectorización de una red de distribución de agua urbana. Aplicación a un caso práctico. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Valencia.
- Samir, N., Kansoh, R., Elbarki, W., Fleifle, A., 2017. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.07.008>

- Shannon, C.E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Socha, K., Dorigo, M., 2008. Ant colony optimization for continuous domains. *Eur. J. Oper. Res.* 185, 1155–1173. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.046>
- Sturm, R., Thornton, J., 2005. Proactive Leakage Management using District Metered Areas (DMA) and Pressure Management—Is it Applicable in North America, in: *IWA Leakage 2005 Conference Proceedings*. pp. 1–13.
- Tanyimboh, T.T., Templeman, A.B., 1993. Calculating Maximum Entropy Flows in Networks. *J. Oper. Res. Soc.* 44, 383–396. <https://doi.org/10.1057/jors.1993.68>
- Tarjan, R., 1972. Depth-First Search and Linear Graph Algorithms. *SIAM J. Comput.* 1, 146–160.
- Thornton, J., Sturm, R., Kunkel, G., 2008. *Water loss control*, Second. ed. McGraw-Hill, New York. <https://doi.org/10.1036/0071499180>
- Todini, E., 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water* 2, 115–122. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)
- Traag, V.A., Waltman, L., van Eck, N.J., 2019. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Sci. Rep.* 9, 5233. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41695-z>
- Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., Bourguett Ortíz, V., 2006. Graph Theory Based Algorithms for Water Distribution Network Sectorization Projects, in: *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 1–15. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)172](https://doi.org/10.1061/40941(247)172)
- Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., Bourguett Ortíz, V., Arreguín Cortés, F., 2014. *Avances En La Hidráulica De Redes De Distribución De Agua Potable*, Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wagner, J., Shamir, U., Marks, D., 1988. Water Distribution Reliability: Analytical Methods. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 114, 253–275.

- Wright, R., Abraham, E., Parpas, P., Stoianov, I., 2015. Control of water distribution networks with dynamic DMA topology using strictly feasible sequential convex programming. *Water Resour. Res.* 51, 9925–9941. <https://doi.org/10.1002/2015WR017466>
- Wright, R., Stoianov, I., Parpas, P., 2014. Dynamic Topology in Water Distribution Networks. *Procedia Eng.* 70, 1735–1744. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.191>
- Wright, Robert, Stoianov, I., Parpas, P., Henderson, K., King, J., 2014. Adaptive water distribution networks with dynamically reconfigurable topology. *J. Hydroinformatics* 16, 1280–1301. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.086>
- Yazdi, J., Choi, Y., Kim, J., 2017. Non-Dominated Sorting Harmony Search Differential Evolution (NS-HS-DE): A Hybrid Algorithm for Multi-Objective Design of Water Distribution Networks. *Water* 9, 587. <https://doi.org/10.3390/w9080587>
- Yue, C., Liang, J., Qu, B., Han, Y., Zhu, Y., Crisalle, O., 2019. A Novel Multiobjective Optimization Algorithm for Sparse Signal Reconstruction. *Signal Processing* 167, 107292. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107292>
- Zhang, K., Yan, H., Zeng, H., Xin, K., Tao, T., 2019. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. *Sci. Total Environ.* 656, 1401–1412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.273>
- Zheng, F., Simpson, A., Zecchin, A., 2011. A combined NLP-differential evolution algorithm approach for the optimization of looped water distribution systems. *Water Resour. Res.* - WATER RESOUR RES 47. <https://doi.org/10.1029/2011WR010394>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PROPIAS

- Ilaya-Ayza, A., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2017). Implementation of DMAs in Intermittent Water Supply Networks Based on Equity Criteria. *Water*, 9(11), 851. <https://doi.org/10.3390/w9110851>
- Ilaya-Ayza, A., Sanjinés, W., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2017). Estrategia para el mantenimiento preventivo de redes de agua potable en países en vías de desarrollo basada en la capacidad de la red. *Congreso de Método Numéricos En Ingeniería*.
- Martins, C., Campbell, E., Ilaya-Ayza, A., Brentan, B., & Izquierdo, J. (2017). Sectorization of Supply Networks Through the Implementation of Self Organized Maps. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3113723>
- Martins, C., Ilaya-Ayza, A., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2017). El caudal máximo teórico en redes y su relación con el índice de resiliencia. *Congreso de Método Numéricos En Ingeniería*.
- Ilaya-Ayza, A., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2016). Gradual transition from intermittent to continuous water supply based on multi-criteria optimization for network sector selection. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 330, 1016–1029. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2017.04.025>
- Ilaya-Ayza, A., Pérez-García, R., Martins, C., & Campbell, E. (2016). Análisis de las causas que originan el suministro de agua intermitente , caso de estudio : zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia). *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 26(NE-2), 49–58. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1027>
- Ilaya-Ayza, A., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Martins, C., & Ayala-Cabrera, D. (2016). La curva de consigna , una herramienta útil para la esqueletización , sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua. *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 26(26(NE-2)), 49–58. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1026>