



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA
DEMANDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
POTABLE**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA
P R E S E N T A :

PEDRO MISAEL ALBORNOZ GÓNGORA



TUTOR:
DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gabriel Echávez Aldape

Secretario: Dr. Velitchko Tzatchkov

Vocal: Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

1^{er}. Suplente: Dr. Carlos Escalante Sandoval

2^{do}. Suplente: Dr. Oscar Fuentes Mariles

Cuernavaca, Morelos, UNAM, Campus Morelos

TUTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

FIRMA

DEDICATORIA

En primer lugar se lo dedico a Dios que nos permite estar aquí; a Lina con todo mi amor y cariño, por ser mi apoyo sentimental y emocional; por permitir que me desarrolle personal y profesionalmente. Gracias por tu enorme paciencia, sacrificio, amor y la felicidad misma. Te amo y mucho.

También dedico este trabajo a José Luis Albornoz Góngora por el apoyo incondicional e incansable; a María del Socorro Góngora Albornoz, que cada día me motiva a ser mejor; y a José Luis Albornoz Lavadores por el consejo de no desesperar en la tormenta y tomar un tiempo de reflexión para encontrar la mejor solución. Eso y su amor como familia es lo mejor que tengo de ustedes.

A Doña Lina, Don Angel, Angel y Dulce por apoyarme en todo momento como familia.

De manera muy especial y afectiva dedico este trabajo al Dr. Víctor H. Alcocer Yamanaka, por apoyarme en todo momento, tanto en lo académico y profesional; incentivar el respeto y gusto por la hidráulica; confiar en mí y ofrecerme la oportunidad de trabajar con él, iniciando así mi vida profesional en la ingeniería hidráulica. Solo me queda decir gracias, por todos sus conocimientos compartidos, espero poder emplearlos de la mejor forma y ser digno de su enseñanza.

A mis compañeros de generación, Claudia porque sin ti, técnicamente no hubiese podido empezar la maestría, por ser una gran amiga; a Héctor por ser amigo y esa competencia académica y profesional que nos hace ser mejores.

Al Dr. Velitchko Tzatchkov por su tiempo, paciencia, valiosos consejos y recomendaciones tanto en lo profesional como en lo académico.

Al Dr. Gabriel Echávez Aldape, por su tiempo, apoyo, experiencia y excelentes comentarios.

Al Dr. Oscar Fuentes, por su profesionalismo, cordialidad e importantes observaciones a mi trabajo.

Al Dr. Carlos Escalante, por todo el apoyo proporcionado para la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de realizar un importante logro en mi carrera profesional.

Al Instituto Mexicano de Tecnología de Agua por el personal y las instalaciones.

Al MI. Víctor Bourguett por la confianza y apoyo profesional.

Al MI. Manuel Rodríguez por compartir su experiencia y conocimiento; a Selene y Oralia por toda la paciencia y ayuda en lo administrativo.

A mi gran amigo MI. Cesar Canul por el eficaz apoyo a distancia.

A los profesores de la Maestría en Hidráulica, Dr. Javier Aparicio, Dr. Heber Saucedo, Dr. Nahún García, MI. Edmundo Pedroza, Dr. Polioptro Martínez, Dr. Víctor Alcocer, MI. José Alfredo González, Dra. Joselina Espinoza, Dr. Felipe Arreguín, Dr. Víctor Arroyo y al Dr. Juan Carlos García

Se agradece al personal de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) UNAM Campus Morelos, Sra. María de Lourdes Barba, Dr. Raúl Flores Berrones y al Dr. Octavio Salazar.

A mis amigos José Manuel, Juan Carlos, David, Marco, Roel, Ruben, Rosa, Alma, Vladimir, Víctor, Juan Gabriel, Jesús, Felipe, Antonio, Javier, Joyce y Mirce por hacer más amena la estancia en Morelos.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
OBJETIVO.....	XV
HIPÓTESIS.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	5
1.1. 2.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES EN LA MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	6
2.2. SIMULACIÓN DINÁMICA.....	15
2.2.1. <u>ECUACIONES GOBERNANTES</u>.....	15
2.2.2. <u>MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJO GRADUALMENTE VARIADO</u>.....	17
2.2.2.1. ECUACIÓN DE LA RED DE NODOS.....	17
2.2.2.2. OTRAS FORMULACIONES PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA.....	18
2.3. TIPOS DE MODELOS.....	19
2.4. MODELOS HIDRÁULICOS.....	19
2.4.1. <u>ETAPAS EN LA ELABORACIÓN DE UN MODELO HIDRÁULICO</u>.....	20

2.4.1.1. ESQUELETIZACIÓN DE LA RED.....	20
2.4.1.1.1. ESTACIONES DE BOMBEO EN LA ESQUELETIZACIÓN.....	21
2.4.1.2. ESTUDIO DE CONSUMOS Y ASIGNACIÓN DE DEMANDAS.....	22
2.4.1.2.1. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA.....	23
2.4.1.2.2. TIPOS DE CONSUMO.....	25
2.4.1.2.3. CRITERIOS DE ASIGNACIÓN.....	25
2.4.1.2.3.1. Asignación nodo por nodo.....	25
2.4.1.2.3.2. Asignación de consumos por sectores.....	26
2.4.1.2.3.3. Asignación de consumos unitarios por calle.....	26
2.4.1.2.4. DISTRIBUCIÓN DE DEMANDAS NODALES.....	27
2.4.1.2.4.1. Distribución espacial de la demanda.....	27
2.4.1.2.4.2. Gasto por unidad de área.....	27
2.4.1.2.4.3. Gasto por unidad de longitud.....	28
2.4.1.2.5. RECOMENDACIONES EN LA ASIGNACIÓN DE CONSUMOS EN MODELOS MATEMÁTICOS.....	29
2.4.1.2.5.1. Asignación de consumos en modelos estáticos.....	29
2.4.1.2.5.2. Asignación de consumos en modelos dinámicos.....	30
2.4.1.2.5.3. Otros factores por considerar.....	31
2.4.2. <u>CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO</u>	32
2.5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO HIDRÁULICO	33
2.6. ELECCIÓN DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA	33
3. ESTADO NACIONAL E INTERNACIONAL DEL ARTE.....	35
3.1. MODELO DE PULSOS RECTANGULARES DE POISSON	36

3.2. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA	
EL PROCESO DE POISSON.....	38
3.2.1. <u>EL PROCESO DE NEYMAN-SCOTT.....</u>	39
3.3. ALCANCES DEL ESQUEMA NEYMAN-SCOTT RECTANGULAR	
PULSES MODEL (NSRPM) EN LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	40
4. ENFOQUE TRADICIONAL Y ESTOCÁSTICO EN LA MODELACIÓN	
DEL CONSUMO DOMÉSTICO.....	41
4.1. ENFOQUE TRADICIONAL EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO.....	42
4.2. ENFOQUE ESTOCÁSTICO EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO.....	44
4.2.1. <u>MODELO DE PULSOS RECTANGULARES NEYMAN-SCOTT APLICADO EN</u>	
<u>LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO.....</u>	44
4.3. VENTAJAS DEL ENFOQUE ESTOCÁSTICO.....	47
4.4. DESVENTAJAS DEL ENFOQUE ESTOCÁSTICO.....	48
5. SITIO DE APLICACIÓN.....	49
5.1. FUENTES DE ABASTECIMIENTO.....	50
5.2. ESTRUCTURAS DE REGULARIZACIÓN Y CONTROL.....	50
5.3. POBLACIÓN DE LA ZONA.....	51
5.4. FUGAS.....	51
5.5. MODELO UTILIZADO EN EL “SECTOR HUMAYA”.....	52
5.6. SITIOS SELECCIONADOS PARA COMPARAR RESULTADOS DE LOS DOS	
ESQUEMAS CON LAS MEDICIONES EN LA RED, Y LA AGREGACIÓN ESPACIAL	
Y TEMPORAL.....	53

6. APLICACIÓN DEL NRSPM.....	54
6.1. METODOLOGÍA EMPLEADA EN TRABAJOS ANTERIORES.....	55
6.2. EMPLEO DEL ESQUEMA DETERMINÍSTICO Y ESTOCÁSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	57
6.2.1. <u>ESQUEMA DETERMINÍSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....</u>	57
6.2.2. <u>ESQUEMA ESTOCÁSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....</u>	59
6.3.1. <u>COMPARACIÓN ENTRE ESQUEMAS.....</u>	64
6.4. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EN TRABAJOS PREVIOS.....	66
7. AGREGACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL CONSUMO DOMÉSTICO (AET).....	68
7.1. METODOLOGÍA DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	69
7.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA EMPLEADA EN LA AGREGACIÓN TEMPORAL.....	71
7.2.1. <u>INTERVALO DE TIEMPO ADECUADO PARA LA AGREGACIÓN TEMPORAL.....</u>	72
7.2.1.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS SERIES GENERADAS BAJO EL ESQUEMA DE NRSPM.....	72
7.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA A EMPLEAR EN LA AGREGACIÓN ESPACIAL.....	79
7.3.1. <u>MÉTODO DE ESQUELETIZACIÓN DE LA RED.....</u>	79
7.3.2. <u>INFLUENCIA DE LA ELÁSTICIDAD DEL AGUA EN LA RED DE ABASTECIMIENTO.....</u>	84
7.3.3. <u>MÉTODO DE AGREGACIÓN DE LOS CONSUMOS DOMICILIARIOS.....</u>	86
8. APLICACIÓN DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	89
8.1. RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN TEMPORAL.....	92
8.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN TEMPORAL CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS.....	94

8.3. RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL.....	96
8.3.1. <u>NODOS DE AGREGACIÓN INVOLUCRADOS EN EL NIVEL UNO, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	97
8.3.2. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL UNO DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	100
8.3.3. <u>NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	104
8.3.4. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	106
8.3.5. <u>NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL TRES DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	110
8.3.6. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL TRES DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO.....</u>	111
8.3.7. <u>NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL UNO DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO ZONAS.....</u>	113
8.3.8. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 1.....</u>	116
8.3.9. <u>NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN CONSIDERAND ZONAS.....</u>	118
8.3.10. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 2.....</u>	120
8.3.11. <u>NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL 3, CONSIDERANDO ZONAS.....</u>	122
8.3.12. <u>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 3.....</u>	124

8.4. CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	125
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y GENERACIÓN DE RECOMENDACIONES.....	126
9.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN TEMPORAL.....	128
9.2. RECOMENDACIONES SOBRE LA AGREGACIÓN TEMPORAL.....	136
9.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL.....	136
9.4. RECOMENDACIONES SOBRE LA AGREGACIÓN ESPACIAL.....	146
10. CONCLUSIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	150

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1. Ejemplo de una red de cuatro tuberías para la formulación de las ecuaciones de la red.....	7
Ilustración 2.2. Proceso de esqueletización de una red.....	21
Ilustración 2-3. Curva de la variación horaria de la demanda.....	23
Ilustración 2-4. Estimación de la demanda o carga del modelo, Hernández, 2009.....	24
Ilustración 2-5. Asignación de demandas a los nodos de consumo.....	26
Ilustración 2-6. Áreas de influencia de los nodos, CONAGUA, 2007.....	28
Ilustración 2-7. Editor de curva de variación o modelación de la demanda dentro del modelo EPANET.....	31
Ilustración 3-1. Representación esquemática del método de pulsos rectangulares de Poisson, PRP (Li y Buchberger, 2006).....	37
Ilustración 5-1. Ubicación del Sector Humaya en la ciudad de Culiacán.....	51
Ilustración 5-2. Red de distribución de la zona Humaya digitalizada dentro del sistema EPANET®	52
Ilustración 5-3. Ubicación en la red de nodos y tramos analizados.....	53
Ilustración 6-1. Metodología utilizada en la validación de las series de consumo empleando el esquema de Neyman-Scott, (Alcocer-Yamanaka, 2007).....	55
Ilustración 6-2. Área de influencia del tramo 2957(Alcocer y Arreguín, 2010).....	58
Ilustración 7-1. Metodología empleada en la agregación espacial y temporal.....	70
Ilustración 7-2. Agregación espacial considerando las reglas 1, 6 y, 7 y 8.....	81
Ilustración 7-3. Agregación espacial considerando las reglas 3, 4 y 5.....	81
Ilustración 7-4. Agregación espacial considerando la regla 8.....	82

Ilustración 7-5. Agregación espacial considerando la regla 9.....	83
Ilustración 7-6. Pulso de la demanda en una tubería simple, Tzatchkov, Alcocer, 2006.....	84
Ilustración 8-1. Esquema empleado en la agregación espacial.....	96
Ilustración 8-2. Diferentes niveles de agregación para la tubería 2957 (Sector Sur).....	97
Ilustración 8-3. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 141, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.....	98
Ilustración 8-4. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1475, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.....	99
Ilustración 8-5. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 219, considerando el punto de equilibrio en el nivel 2.....	104
Ilustración 8-6. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1356, considerando el punto de equilibrio en el nivel 2.....	105
Ilustración 8-7. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 3013 y 832 considerando el punto de equilibrio y nivel 3 de agregación.....	110
Ilustración 8-8. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1475 considerando agregación por zona y nivel 1.....	114
Ilustración 8-9. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1356, considerando agregación por zona y nivel 2.....	118
Ilustración 8-10. Nodos cuyo consumo se agrega a los nodos 3013 y 832, considerando nivel tres de agregación por zona.....	122
Ilustración 9-1. Ubicación en la red del nodo 165 y la tubería 2957 (Arreguín, Alcocer, 2010)...	127
Ilustración 9-2. Comparación de una red completa y una dividida para agregar las demandas.	142
Ilustración 9-3. Ubicación a detalle de la tubería 2957 y el nodo 3013.....	143
Ilustración 9-4. Sector norte donde se ubica el nodo 165.....	144

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1. Curva de variación horaria de la demanda para la República Mexicana (Ochoa et al, 1994).....	43
Gráfica 4-2. Curva de la demanda para un domicilio en el día lunes, con el esquema de Neyman-Scott ($\Delta t=1$ min).....	46
Gráfica 4-3. Curva de la demanda para un domicilio en el día lunes, con el esquema de Neyman-Scott ($\Delta t=30$ min).....	47
Gráfica 6-1. Presión en el Nodo 165 para el escenario empleando la Curva de Variación Horaria de la Demanda y el programa EPANET, (Hernández, 2009) y (Alcocer y Arreguín ,2010).....	58
Gráfica 6-2. Caudal calculado en el Tramo 2957, con la CVHD y EPANET (Arreguín, Alcocer, 2010).....	59
Gráfica 6-3. Presión en el Nodo 165 para el escenario estocástico (Alcocer y Arreguín, 2010).....	63
Gráfica 6-4. Caudal calculado en el Tramo 2957, en el escenario estocástico (Alcocer y Arreguín, 2010).....	63
Gráfica 6-5. Comparación de las presiones registradas en el nodo 165 con los esquemas utilizados, (Arreguín y Alcocer, 2010).....	65
Gráfica 6-6. Comparación del caudal medido con los resultados obtenidos aplicando la CVHD y el esquema estocástico en el tramo 2957 (Arreguín, Alcocer, 2010).....	66
Gráfica 7-1. Picos de los caudales ocurridos en un minuto en series sintéticas con el esquema NSRPM.....	71
Gráfica 7.2. Señales de la series sintéticas generadas en el espacio físico para las	

casas 04, 19, 43, 45, y 51 con consumo medio (3-4), Moreno, 2009.....	73
Gráfica 7-3. Espectros de las series sintéticas generadas para las casas 04, 19, 43, 45, y 51 con consumo medio (3-4), Moreno, 2009.....	74
Gráfica 7-4. Espectros de las series sintéticas generadas para las casas 01, 16, 38, 47, y 57 con consumo bajo (3-4), Moreno, 2009.....	74
Gráfica 7-5. Representación del fenómeno de enmascaramiento o <i>aliasing</i> , Moreno, 2009.....	75
Gráfica 7-6. Frontera que define los procesos de agregación y desagregación temporal obtenida a partir de espectros (Moreno ,2009).....	77
Gráfica 7-7. Picos de los flujos ocurridos en lapsos de 30 minutos.....	78
Gráfica 7-8. Comparación de la serie original y la serie agregada.....	78
Gráfica 7-9. Agregación de los consumos en el nodo 162.....	88
Gráfica 8-1. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico alto.....	90
Gráfica 8-2. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico medio.....	91
Gráfica 8-3. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico bajo.....	91
Gráfica 8-4. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico alto.....	92
Gráfica 8-5. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico medio.....	93
Gráfica 8-6. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico bajo.....	93
Gráfica 8-7. Presión en el nodo 165 considerando la agregación temporal de 30 minutos.....	94
Gráfica 8-8. Caudal en la tubería 2957 considerando la agregación temporal de 30 minutos....	95
Gráfica 8-9. Curvas de la demanda de los nodos de agregación 141 y 1475, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.....	100
Gráfica 8-10. Presión en el nodo 165, considerando el punto de equilibrio, nivel 1 de agregación.....	101
Gráfica 8-11. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 1 de agregación.....	102

Gráfica 8-12. Presión en el nodo 3013, considerando el punto de equilibrio, nivel 1 de agregación.....	103
Gráfica 8-13. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 219 y 1356 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.....	106
Gráfica 8-14. Presión en el nodo 165 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.....	107
Gráfica 8-15. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 2 de agregación.....	108
Gráfica 8-16. Presión en el nodo 3013 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.....	109
Gráfica 8-17. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 3013 y 832 considerando el punto de equilibrio y nivel 3 de agregación.....	111
Gráfica 8-18. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 3 de agregación.....	112
Gráfica 8-19. Presión en el nodo 3013 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.....	113
Gráfica 8-20. Patrón de la demanda introducido en el nodo 1475 considerando zonas de agregación en el nivel 1.....	115
Gráfica 8-21. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel 1 de agregación por zona.....	116
Gráfica 8-22. Presión en el nodo 3013 considerando nivel 1 de agregación por zona.....	117
Gráfica 8-23. Patrón de la demanda introducido en el nodos 1356 considerando zonas de agregación en el nivel 2.....	119
Gráfica 8-24. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel de agregación 2 por zonas.....	120
Gráfica 8-25. Presión en el nodo 3013 considerando nivel 2 de agregación por zona.....	121
Gráfica 8-26. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 3013 y 832	

considerando el nivel 3 de agregación por zona.....	123
Gráfica 8-27. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel de agregación 3 por zonas.....	124
Gráfica 8-28. Presión en el nodo 3013 considerando nivel.....	125
Gráfica 9-1. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico alto.....	128
Gráfica 9-2. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico medio.....	129
Gráfica 9-3. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico bajo.....	129
Gráfica 9-4. Comparación de las presiones en el nodo 165 considerando la agregación temporal.....	131
Gráfica 9-5. Comparación de los caudales en el link 2957 considerando la agregación temporal.....	132
Gráfica 9-6. Comportamiento de las fugas dependiendo del tiempo de duración de los pulsos.....	135
Gráfica 9-7. Comparación de los caudales en la tubería 2957, considerando agregación por zona y punto de equilibrio.....	138
Gráfica 9-8. Comparación de la presiones en el nodo 3013.....	143
Gráfica 9-9. Comparación de la presión en el nodo 165 considerando la agregación espacial por zonas y punto de equilibrio.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de los modelos, con base en el objetivo o el criterio.....	19
Tabla 2-2. Valores de los coeficientes de variación diaria y horaria, [CNA, 2004].....	30
Tabla 3-1. Parámetros básicos utilizados en los PRP.....	37
Tabla 4-1. Valores obtenidos para el trazo de la Curva de Variación Horaria de la Demanda (Ochoa et al, 1994).....	43
Tabla 6-1. Bloques horarios para el análisis de consumos registrados, en función del comportamiento típico de la demanda.....	60
Tabla 6-2. Rango de búsqueda para obtener los parámetros del modelo Neyman-Scott (Hernández, 2009).....	61
Tabla 6-3. Resultados de tres viviendas, a partir del esquema de optimización para obtener los parámetros del Modelo Neyman-Scott (Hernández, 2009).....	62
Tabla 6-4. Comparación de presiones mínimas y máximas en el nodo 165.....	64
Tabla 6-5. Comparación de los caudales máximos en el tramo 2957.....	65
Tabla 7-1. Resumen de la frontera obtenida de los espectros para cada horario dividido por consumo, Moreno, 2009.....	76
Tabla 7-2. Longitud de la tubería entre el nodo 165 y el nodo más lejano de agregación.....	85
Tabla 7-3. Agregación de 8 consumos para generar el patrón de la demanda del nodo 162.....	87
Tabla 8-1. Nodos de agregación empleados en el nivel 1, considerando el punto de equilibrio.....	98
Tabla 8-2. Nodos de agregación empleados en el nivel 2 de agregación, considerando el punto de equilibrio.....	104
Tabla 8-3. Nodos de agregación considerando agregación por zonas en el nivel 1.....	114
Tabla 8-4. Nodos de agregación empleados en el nivel 2 de agregación, considerando	

agregación por zona.....	118
Tabla 9-1. Porcentaje del caudal reducido en los picos con la agregación temporal.....	130
Tabla 9-2. Comparación en la desviación estándar con datos obtenidos de la presión en el nodo 165.....	132
Tabla 9-3. Comparación en la desviación estándar con datos obtenidos del caudal en la tubería 2957.....	133
Tabla 9-4. Comparación del caudal promedio medido y calculado en la tubería 2957 en la simplificación de la red.....	139
Tabla 9-5. Desviación del caudal en la tubería 2957, debido al método y nivel de simplificación.....	140
Tabla 9-6. Volúmenes desviados en la tubería 2957 debido a la agregación temporal.....	140

OBJETIVO

Definir criterios y recomendaciones de carácter hidráulico en el proceso de agregación espacial y temporal del consumo doméstico, durante la implementación de modelos de simulación hidráulica aplicados en redes de distribución de agua potable en estados permanente y transitorio.

HIPÓTESIS

1. La simplificación de redes de distribución de agua potable durante el proceso de simulación hidráulica, conlleva al incremento de incertidumbre en los resultados de las distintas variables analizadas.
2. Considerar un enfoque estocástico en el consumo doméstico de agua potable y un proceso de agregación espacial y temporal definido permitirá reducir la incertidumbre generada en los resultados de las variables, producto de la simplificación de la red de distribución en el proceso de la simulación hidráulica y de calidad del agua.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio de las redes de distribución de agua potable actualmente es esencial apoyarse en un modelo de simulación matemática que considere el comportamiento hidráulico y de calidad del agua, asimismo que tenga asignado un patrón de demanda realista en cada nodo de la red; todo ello con el fin de obtener valores confiables en las variables hidráulicas (presión, caudal, nivel, etc.), como de calidad del agua, por ejemplo, la concentración del desinfectante en cada punto e instante de la red simulada (Blokker et al, 2008) y recientemente la interacción de varios contaminantes en el seno del fluido (Shang y Uber, 2008).

Es importante que un modelo de simulación esté alimentado con datos medidos y con ello, establecer un proceso de calibración que permita obtener resultados confiables. Los modelos son considerados en la planificación, diseño y gestión de una red nueva, así como en redes en servicio, ayudarán a proyectar ampliaciones e identificar problemas comunes como son: fugas, instalaciones viejas, toma clandestina, estado real de las válvulas, instalaciones posteriores al diseño original, etc.

Actualmente la carencia de información confiable, es una de las principales limitantes de la evaluación y la predicción del comportamiento hidráulico de los sistemas de distribución.

En México, según la Comisión Nacional del Agua, en el 2007 se estimó que aproximadamente el 60% de las tomas de agua de todo el país cuenta con micromedidores en funcionamiento y del caudal producido en el país, se mide el 70 por ciento. Sin embargo estas cifras poseen un alto grado de incertidumbre, por ejemplo, dentro de la macromedición no se considera en este reporte anual, la precisión en la medición y el estado de los mismos; en otras palabras, puede ser lo mismo tener o no el macromedidor instalado, según el estado en que se encuentre. Finalmente esta situación conlleva a calcular indicadores de gestión y proyecciones erróneas.

Por tal motivo, la información es escasa y la existente resulta poco confiable; en consecuencia, esto también afecta la variable hidráulica que representa el consumo doméstico. Lo que se traduce en diseños erróneos de tuberías y en general de infraestructura hidráulica (sub y sobredimensionamiento).

A través del tiempo se han propuesto y empleado diversos patrones y esquemas de consumo que se introducen en los modelos hidráulicos con el fin de reproducir el comportamiento real del flujo en la red. En este contexto en 1995, (Buchberger y Wu), demostraron que el consumo doméstico sigue un patrón estocástico no permanente, que se puede representar por medio de pulsos rectangulares que consideran la duración e intensidad.

En el 2007 en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Alcocer-Yamanaka), empleó el esquema de Neyman Scott (NSRPM) para representar el consumo doméstico obteniendo

resultados satisfactorios. Este método se validó para redes donde cada domicilio representaba un nodo de la red (red de distribución completa), en la cual se asignó una de las series sintéticas obtenidas como patrón de consumo con el esquema NSRPM. Los resultados obtenidos mostraron que al utilizar el coeficiente de variación horaria de la demanda (CVHD) se sobrestima aproximadamente en un 58 por ciento el caudal medido en la red, mientras que al utilizar el patrón de consumo con el esquema NSRPM, se subestima el caudal medido en un 25 por ciento. Obteniendo de esta forma una mejor aproximación del caudal real en la red (Hernández, 2009). Este resultado sugiere que se pueden obtener resultados más apegados a la realidad al aplicar un mayor número de series sintéticas en la modelación.

Por otro lado, considerar todos los tramos y nodos de una red de distribución de agua potable, al momento de abordarla a través de los análisis hidráulicos y de calidad del agua, presenta un número considerable de implicaciones por atender, sin embargo actualmente es posible con los equipos de cómputo que procesan un gran número de operaciones en segundos. Generalmente presenta la desventaja de obtener resultados erróneos o imprecisos derivados del orden de magnitud de la misma.

Por ejemplo, el proceso de calibración que se define en términos prácticos, como la minimización de la diferencia entre los resultados obtenidos a partir de las simulaciones empleando el modelo de simulación, y el comportamiento hidráulico real dentro de la red; normalmente conlleva a realizar extensas campañas de medición, generando aumento en el empleo de recursos económicos y humanos; motivo por el cual se recurre a simplificar las redes de distribución.

La simplificación de la red es una práctica común, que no se basa en criterios hidráulicos y por ende, se desconocen las implicaciones que afectan directamente a los resultados. Por otro lado, normalmente se emplea una sola serie para representar los consumos, ello nuevamente facilita y reduce la complejidad del problema abordado; por lo anterior, recientemente diferentes investigadores han propuesto métodos con mayor rigor y realismo introduciendo patrones estocásticos de consumo en los usuarios, e implícitamente en los nodos, intentando obtener resultados con mayor apego a la situación abordada.

Estos nuevos métodos impactan tanto en resultados hidráulicos (presión, caudal, nivel), como en aplicaciones de calidad del agua (cloro residual, flúor, etc.)

Con base en lo anterior se propone el esquema estocástico de Neyman Scott aplicado a la red completa y simplificada. En ellas se realizará la agregación espacial y temporal del consumo, utilizando un conjunto de series sintéticas.

Validar este proceso permitirá establecer criterios en la introducción de valores de consumo en cada nodo antes y después de la agregación del consumo, además se obtiene un método de agregación espacial y temporal del consumo apropiado.

De esta forma, se busca minimizar los errores en la modelación (menor incertidumbre), obteniendo así, mejores resultados que los obtenidos con los métodos convencionales (utilizando

el CVHD); tanto en una red completa como simplificada, ello dependerá de la aplicación que se aborde.

Para la validación de la presente tesis, se cuenta con los resultados obtenidos previamente por Hernández (2009), donde se representó el consumo por usuario empleando el esquema de NSRPM, aplicado en el sector "Humaya", Culiacán, Sinaloa.

Finalmente el objetivo del presente trabajo se basa en la agregación espacial y temporal de la demanda empleando el esquema NSPRM y emplea varias series sintéticas como patrón de consumo. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones con otros resultados que se obtuvieron empleando como patrón de consumo el coeficiente de variación horaria de la demanda (el propuesto por la Comisión Nacional del Agua) y los datos medidos en la red. De los resultados se establecen criterios para la modelación de redes de abastecimiento, así como también se determina la magnitud de las implicaciones y diferencias al emplear el uso del coeficiente de variación horaria de la demanda como patrón de consumo y el patrón obtenido con el esquema de NSPRM.

2. MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

2. MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Actualmente los programas que modelan y simulan hidráulicamente las redes de distribución de agua potable son esenciales para el cálculo de los parámetros hidráulicos y de calidad del agua, ya que generan resultados que se consideran en la planificación, operación y gestión de la red. De tal forma que el problema de análisis está resuelto si se provee de datos correctos a un modelo de simulación hidráulica.

Existen diferentes instituciones que ofrecen sus productos dentro del mercado (EPANET, Scadred, Infoworks, etc.), la elección del producto a utilizar depende de las necesidades específicas de análisis que demande la red, así como también, del recurso económico disponible.

Generalmente, un modelo hidráulico provee un conocimiento detallado del funcionamiento hidráulico en la red de distribución, por ende aporta otros beneficios provenientes de una operación más consciente y un mejor control (Alcocer-Yamanaka, 2007).

2.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES EN LA MODELACIÓN HIDRÁULICA APLICADA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

La formulación de las ecuaciones de la red, busca balancear las pérdidas de carga de una serie de tuberías con puntos en donde se conoce la diferencia de energía entre ellas. Todini y Pilati (1987) exponen la ecuación de conservación de energía de cada tubería (Ecuación 2-1),

$$H_A - H_B = K_l [Q_l]^n \quad 2-1$$

$$\sum_{l \in J_{in}} Q_l - \sum_{l \in J_{out}} Q_l = q_i \quad 2-2$$

Donde,

H es la carga total;

l , número de tuberías;

i , número de nodos

Q , caudal.

Resultando un sistema de ecuaciones de n tuberías con m caudales y k nodos de carga desconocidas. Posteriormente las acoplan, dejando las ecuaciones nodales en términos de caudales (ecuación 2-2.), de esta forma se iguala el número de incógnitas con el número de ecuaciones. El método se conoce también como *hybrid* o *gradient approach*.

Por ejemplo, para la red de cuatro tuberías mostrada en la Ilustración 2-1, se presenta el sistema de ecuaciones considerando una ecuación para cada nodo y tubería. La configuración asume la dirección del flujo y la ecuación está basada en la conservación de masa (principio de continuidad).

$$F_{Q,2} : +Q_1 - Q_2 - Q_3 - q_2 = 0 \quad \{\text{nodo 2}\} \quad 2-3$$

$$F_{Q,3} : +Q_2 - Q_4 - Q_3 = 0 \quad \{\text{nodo 3}\} \quad 2-4$$

$$F_{Q,4} : +Q_3 - Q_4 - q_4 = 0 \quad \{\text{nodo 4}\} \quad 2-5$$

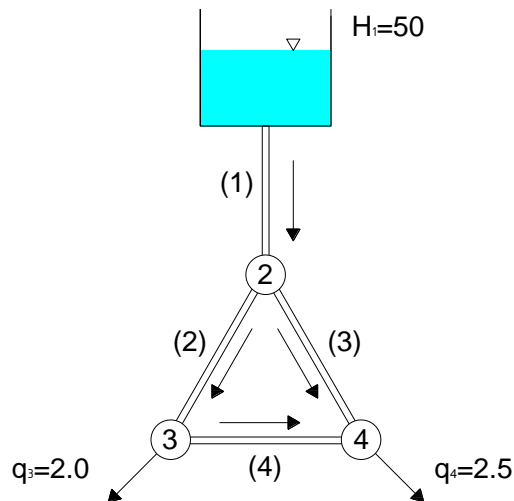


Ilustración 2-1. Ejemplo de una red de cuatro tuberías para la formulación de las ecuaciones de la red.

Posteriormente en las ecuaciones que se presentan a continuación, a la izquierda se escribe el caudal en la tubería y la carga hidráulica en el nodo del lado derecho. La pérdida por fricción se asigna con el signo positivo, por lo tanto la carga del nodo aguas arriba tiene signo negativo y el de aguas abajo signo positivo.

Las ecuaciones para las tuberías de la 1 a la 4 en una red son:

$$F_{p,1} : K_1 [Q_1]^n + H_2 - H_1 = 0 \quad \{tubería 1\} \quad 2-6$$

$$F_{p,2} : K_2 [Q_2]^n - H_2 + H_3 = 0 \quad \{tubería 2\} \quad 2-7$$

$$F_{p,3} : K_3 [Q_3]^n - H_2 + H_4 = 0 \quad \{tubería 3\} \quad 2-8$$

$$F_{p,4} : K_4 [Q_4]^n - H_3 + H_4 = 0 \quad \{tubería 4\} \quad 2-9$$

Donde H_1 (carga hidráulica) y todas las K (coeficiente de fricción) son conocidas.

La notación $[Q_1]^n$, indica que el valor absoluto del caudal de la tubería 1 es elevado a la potencia n y el signo del caudal de la tubería se aplica al término de la pérdida en la ecuación. El signo del caudal también se aplica en la ecuación nodal. De tal forma que un caudal negativo es aceptable y se define como un caudal que tiene una dirección opuesta de la asumida inicialmente. La conservación de masa y energía se constituye por siete ecuaciones, cuatro del caudal en tuberías y tres de cargas nodales.

Aplicando el método de Newton-Raphson (resolviendo para los cambios en gasto y cargas) para la tubería l que conecta los nodos i y j resulta:

$$\sum_{l \in J_{in} \cup J_{out}} \left(\frac{\partial F_Q}{\partial Q_l} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q_l^{(m)} \right) = -F_Q(Q^{(m-1)}) \quad 2-10$$

$$\frac{\partial F_p}{\partial H_i} \Big|_{\Delta H=0} \Delta H_i^{(m)} + \frac{\partial F_p}{\partial H_j} \Big|_{\Delta H=0} \Delta H_j^{(m)} + \frac{\partial F_p}{\partial H_l} \Big|_{\Delta H=0} \Delta H_l^{(m)} = -F_p(Q^{(m-1)}, H^{(m-1)}) \quad 2-11$$

La derivada de la ecuación de balance de masa (F_Q) es 1 (tubería de salida), -1 (tubería de entrada) o cero (tubería no conectada al nodo). El lado derecho de la ecuación se calcula sustituyendo las estimaciones actuales de la razones de los caudales definidos como dq , para el nodo 2 la ecuación es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_Q}{\partial Q_1} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q_1^{(m)} + \frac{\partial F_Q}{\partial Q_2} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q_2^{(m)} + \frac{\partial F_Q}{\partial Q_3} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q_3^{(m)} &= -F_{Q1} \left(Q^{(m-1)} \right) = \\ (+1)\Delta Q_1 + (-1)\Delta Q_2 + (-1)\Delta Q_3 &= -\left(+Q_1^{(m-1)} - Q_2^{(m-1)} - Q_3^{(m-1)} - q_2 \right) = -dq_2 \quad 2-12 \\ \{F_{Q,2} : \text{nodo 2}\} & \end{aligned}$$

De forma análoga se obtienen las ecuaciones del nodo 3 y 4,

$$\begin{aligned} (+1)\Delta Q_1 + (-1)\Delta Q_2 + (-1)\Delta Q_3 &= -\left(+Q_1^{(m-1)} - Q_2^{(m-1)} - Q_3^{(m-1)} - q_2 \right) = -dq_2 \quad 2-13 \\ \{F_{Q,2} : \text{nodo 2}\} & \end{aligned}$$

$$+\Delta Q_2 - \Delta Q_4 = -\left(+Q_2^{(m-1)} - Q_4^{(m-1)} - q_2 \right) = -dq_3 \quad \{F_{Q,3} : \text{nodo 3}\} \quad 2-14$$

$$+\Delta Q_3 - \Delta Q_4 = -\left(+Q_3^{(m-1)} - Q_4^{(m-1)} - q_4 \right) = -dq_4 \quad \{F_{Q,4} : \text{nodo 4}\} \quad 2-15$$

Para el balance de energía, la derivada con respecto a la carga nodal es 1 (nodo inferior), -1 (nodo fuente), y 0 (a los nodos no conectados a la tubería). La derivada con respecto al caudal de la tubería es $nK|Q|^{n-1}$. El lado derecho de la ecuación se calcula iterando el resultado, los resultados del caudal y las cargas nodales se define como dE .

Para la tubería 1 la ecuación es:

$$nK_1|Q_1|^{n-1} \Delta Q_1 + (+1)\Delta H_2 = -\left(H_2 + K_1Q_1^n - H_1 \right) = -dE_1 \{F_{P1} : \text{pipe 1}\} \quad 2-16$$

El gradiente para la carga en el nodo uno es cero desde que es ajustado la carga del tanque de almacenamiento. El nodo 2 que está aguas abajo tiene un gradiente positivo y el caudal en la tubería se evaluará de aquí en adelante como Q^{m-1} . Por claridad el contador de iteraciones $m-1$ no se incluye en todas la ecuaciones de la red.

Las ecuaciones para las tuberías de la 2 a la 4 son:

$$nK_2 |Q_2|^{n-1} \Delta Q_2 - \Delta H_2 + \Delta H_3 = -(-H_2 + H_3 + K_2 Q_2^n) = -dE_2 \{F_{P2} : pipe 2\} \quad 2-17$$

$$nK_3 |Q_3|^{n-1} \Delta Q_3 - \Delta H_2 + \Delta H_4 = -(-H_2 + H_4 + K_3 Q_3^n) = -dE_3 \{F_{P3} : pipe 3\} \quad 2-18$$

$$nK_4 |Q_4|^{n-1} \Delta Q_4 - \Delta H_3 + \Delta H_4 = -(+H_3 - H_4 + K_4 Q_4^n) = -dE_4 \{F_{P4} : pipe 4\} \quad 2-19$$

Estas siete ecuaciones (2-13 a 2-19) pueden ser resueltas cambiando las cargas en los nodos y los gastos en las tuberías. Los nuevos valores para iterar se calculan por:

$$H^{(m)} = H^{(m-1)} + \Delta H^{(m)} \quad 2.20$$

$$Q^{(m)} = Q^{(m-1)} + \Delta Q^{(m)} \quad 2.21$$

Todini y Pilati (1987) generalizaron este planteamiento en la forma matricial.

Las ecuaciones de conservación de energía y masa de Hardy Cross (1936)

$$F_{LP}(Q) = \sum_{l \in loop} K_l [Q_l]^n = 0 \quad 2-22$$

Y Wood y Rayes (1981)

$$F(Q) = \sum_{l \in loop} K_l [Q_l]^n = 0 \quad 2-23$$

Se convierten respectivamente en

$$F_p(Q,H)=A_{11}Q^{(m)}+A_{12}H^{(m)}=0 \quad 2-24$$

$$F_Q(Q,H)=A_{21}Q^{(m)}-q=0 \quad 2-25$$

En las ecuaciones nodales y de tuberías escritas anteriormente, se refleja que los coeficientes sobre los caudales que entran y salen del nodo 2 son 1, -1, -1, y 0; para las tuberías 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Estos valores son idénticos a los coeficientes a la columna relacionada con la carga nodal H_2 de las ecuaciones de la tubería. Estos coeficientes componen las matrices, A_{12} y A_{21} .

A_{21} es la conectividad, también conocida como la topología, matriz $A_{12} = A_{21}^T$. El término en la matriz A_{12} identifica las conexiones de la red y toma los valores de 1, -1, y 0. Cada columna corresponde a una tubería y asigna -1 a los nodos aguas arriba de la tubería, 1 al nodo de salida de la tubería y 0 si la tubería no está conectada al nodo. Para una red de 4 tuberías se tiene:

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ y } A_{12} = A_{21}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

A_{11} se define como:

$$\begin{bmatrix} K_1 |Q_1|^{n-1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & K_{npipe} |Q_{npipe}|^{n-1} \end{bmatrix} \quad 2-26$$

Se ve que las filas en A_{21} corresponden a los nodos de la 2 a la 4.

Aplicando el esquema de solución de Newton al sistema de ecuaciones se tiene:

$$dF_p(Q,H) = nA_{11}\Delta Q^{(m)} + A_{12}\Delta H^{(m)} = -dE \quad 2-27$$

$$dF_Q(Q,H) = A_{21}\Delta Q^{(m)} = -dq \quad 2-28$$

Las ecuaciones resultantes para las cuatro tuberías de la red se expresan desde la ecuación 2-13 hasta la 2-19. Los términos del lado derecho de las ecuaciones de la red muestran el residuo del balance de energía y energía en la iteración $m-1$. Esta configuración de las ecuaciones es resuelta para ΔQ , ΔH , $H^{(m)}$ y $Q^{(m)}$ y se actualizan por:

$$H^{(m)} = H^{(m-1)} + \Delta H^{(m)} \quad 2-29$$

$$Q^{(m)} = Q^{(m-1)} + \Delta Q^{(m)} \quad 2-30$$

Como en otros métodos, el cambio en el caudal o el número de iteraciones se utiliza como criterio para detener las iteraciones.

El procedimiento completo para solucionar la ecuación de la tubería es:

1. Iniciar con $m = 0$ y definir el arreglo inicial de las carga nodales, H^0 , los caudales en las tuberías, Q^0
2. Formar la matriz A_{12}
3. Configurar $m = m + 1$
4. Formar la matriz nA_{11} usando la ecuación 2-24
5. Se calcula el error de balance en los nodos ($dF_Q = -dq$) usando la ecuación 2-22 y el error de balance en las tuberías ($dF_H = -dE$) con la ecuación 2-23
6. Resolver el sistema de ecuaciones (ecuaciones 2-27 y 2-28) para ΔH y ΔQ
7. Actualizar las cargas nodales y los gastos en las tuberías usando las ecuaciones 2-29 y 2-30
8. Revisar el criterio para detener las iteraciones, si se cumplen, entonces se detiene el proceso, de lo contrario regresar al paso 3.

Ejemplo. Asumiendo que todas las tuberías son idénticas en la red y aplicando la ecuación de Hazen-Williams con $K = 0.935$ y $n = 1.852$. Se asume que el caudal en las cuatro tuberías son $[4.5, 2, 2, 0.5]$ y las cargas nodales son $[40, 35, 30]$. La carga en la fuente, H_1 , es 50. La matriz A_{12} se da antes y A_{11} la matriz diagonal se calcula por $KQ^{n-1} = KQ^{0.852}$. Para la tubería 1, $K|Q|^{0.852} = 0.935(4.5)^{0.852} = 3.37$ y el término en la matriz de solución es $1.852K|Q|^{0.852} = 6.24$. Todo el lado izquierdo de la matriz es:

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{nA_{11}}{A_{21}} & \frac{A_{12}}{0} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc|ccc} 6.24 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3.13 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3.13 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.96 & 0 & -1 & 1 \\ \hline 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Donde la parte superior izquierda es $nK|Q|^{n-1}$, la parte superior derecha es A_{12} , la parte inferior izquierda son los coeficientes de las cargas nodales.

El lado derecho de las ecuaciones son los errores de las ecuaciones. Para la tubería 1, dE_1 se calcula de la ecuación 2-16:

$$-(K_1Q_1^n + H_2 - H_1) = -dE_1 = -(0.935(4.5)^{1.852} + 40 - 50) = -5.16$$

Para el nodo 2 (ecuación 2-13)

$$-(+Q_1 - Q_2 - Q_3 - q_2) = -dq_2 = -(4.5 - 2 - 2 - 0) = -0.5$$

Después de calcular los valores de cada ecuación la transpuesta de lado derecho de la ecuación es:

$$[-dE | -dq]^T = [-5.16 \quad 1.62 \quad 6.62 \quad 4.74 | -0.5 \quad 0.5 \quad 0]^T$$

Y la matriz de la ecuación completa es:

$$\begin{bmatrix} \frac{nA_{11}}{A_{21}} & \frac{A_{12}}{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -dE \\ -dq \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc|ccc} 6.24 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3.13 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3.13 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.96 & 0 & -1 & 1 \\ \hline 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \\ \Delta H_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.16 \\ 1.62 \\ 6.62 \\ 4.74 \\ -0.5 \\ 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Resolviendo para ΔQ y ΔH se tiene:

$$[\Delta Q | \Delta H]^T = [0 \quad 0.247 \quad 0.253 \quad -0.253 | -5.16 \quad -4.30 \quad 0.68]^T$$

Substituyendo este vector en la ecuación 2-29 y 2-30 se obtienen el caudal y la carga para la siguiente iteración,

$$[Q | H]^T = [4.5 \quad 2.247 \quad 2.253 \quad 0.247 | 34.84 \quad 30.70 \quad 30.68]^T$$

Se repite este proceso iterando hasta obtener el resultado final:

$$[Q | H]^T = [4.5 \quad 2.24 \quad 2.26 \quad 0.24 | 34.85 \quad 30.69 \quad 30.62]^T$$

2.2. SIMULACIÓN DINÁMICA

Durante el estado permanente o en simulaciones de periodos extendidos, la demanda requerida y las condiciones de operación se asumen para cambios instantáneos, es decir el estado permanente es alcanzado inmediatamente después de que ocurre el cambio. En otros casos, la transición entre las diversas condiciones hidráulicas puede ser importante. La simulación dinámica (enfoque de parámetros agrupados), considera el flujo gradualmente variado y pequeños movimientos transitorios asumiendo que el agua actúa como incompresible, es decir, no se afecta la densidad del agua con la presión. El análisis transitorio completo (enfoque de parámetros distribuidos) considera una columna de agua elástica en donde la densidad del agua puede ser variable.

2.2.1. ECUACIONES GOBERNANTES

En estado dinámico, las ondas de presión y las fuerzas provocan variación del caudal. De tal forma que las ecuaciones que gobiernan son conservación de masa y *momentum*, mejor dicho la conservación de masa y cantidad de movimiento. Dado que bajo condiciones de estado permanente la conservación de masa es el balance de caudal en los nodos, la conservación de *momentum* se aplica a las tuberías (Ilustración 2-1) en la cual las fuerzas del fluido en la red se igualan, la razón de tiempo y el cambio del momento en la tubería es:

$$\sum F = F_1 - F_2 - F_f = \frac{d(mV)}{dt} = ma$$

Donde F_1 y F_2 son las fuerzas en el final de la sección de control debido a la carga total del fluido y F_f es la fuerza debida a la fricción. Estos balances con la razón de cambio de *momentum* del fluido en la sección de control, que tiene masa, m , y velocidad V , es igual a la aceleración de la masa del fluido, a . Tal que la ecuación anterior es la segunda ley de Newton

$$F = ma$$

Las fuerzas finales son iguales a las fuerzas debido a la presión y gravedad es decir,

$$F_1 = \gamma A \left[\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right] = \gamma A h_1$$

Donde A es el área de la sección transversal de la tubería y γ es el peso específico del agua. Un término similar se escribe en el lado derecho. La fuerza de fricción es la fuerza causada por la pérdida de energía en la sección de control, h_L , es decir,

$$F_f = \gamma A h_L \quad 2-31$$

La razón de cambio del momento puede ser expandido para ser consistente en los términos similares como:

$$\frac{d(mV)}{dt} = \frac{d(\rho \nabla V)}{dt} = \frac{d\left(\frac{\gamma}{g} ALV\right)}{dt} = \frac{\gamma L}{g} \frac{d(AV)}{dt} = \frac{\gamma L}{g} \frac{dQ}{dt}$$

Sustituyendo términos en la ecuación anterior en una relación similar a la de conservación de energía, excepto que el lado derecho de la ecuación no es igual a cero durante las condiciones no permanentes (Wood et al 1990) se tiene:

$$h_1 - h_2 + KQ^n = \frac{\gamma L}{g} \frac{dQ}{dt}$$

La ecuación puede ser escrita para una sola tubería o un arreglo de tuberías en serie (por ejemplo cerrada o pseudo cerrada). Estas ecuaciones pueden ser combinadas con la conservación de masa para formar diferentes configuraciones, estas pueden ser solucionadas para las cargas totales y el caudal en las tuberías.

2.2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

2.2.2.1. ECUACIÓN DE LA RED DE NODOS

Hollaway (1985), Islam y Chaudhry (1998) estructuraron las ecuaciones para una red de nodos teniendo tantas ecuaciones como tuberías. Para una red cerrada, la carga nodal en la ecuación anterior es la presión total en el mismo punto (en el inicio y final de la red), tal que la ecuación se convierte en:

$$-\sum_{l \in \text{loop}} K_l Q_l^n = \sum_{l \in \text{loop}} \frac{\gamma L}{g} \frac{(Q_l^{t+\Delta t} - Q_l^t)}{\Delta t}$$

Esta ecuación se resuelve hacia adelante en el tiempo para valores de $Q^{t+\Delta t}$ por separación de variables e integración en el tiempo.

$$\int_t^{t+\Delta t} - \left[\sum_{l \in \text{loop}} K_l Q_l^n \right] dt = \int_{Q^t}^{Q^{t+\Delta t}} \sum_{l \in \text{loop}} \frac{L}{gA} dQ = \sum_{l \in \text{loop}} \frac{L}{gA} (Q_l^{t+\Delta t} - Q_l^t)$$

2-32

Hollaway (1985) sugirió que el término de pérdida de fricción del lado derecho de la ecuación puede ser aproximado por varios caminos.

$$K Q^{t+\Delta t} |Q^t|^{n-1} \Delta t$$

$$K \left[(Q^{t+\Delta t} + Q^t) |Q^{t+\Delta t} + Q^t|^{n-1} / 2^n \right] \Delta t$$

$$K \left[(Q^{t+\Delta t} |Q^{t+\Delta t}|^{n-1} + Q^t |Q^t|^{n-1}) / 2^n \right] \Delta t$$

La primera aproximación mantiene la linealidad con respecto a la incógnita $Q^{t+\Delta t}$. Hollaway comparó esta aproximación de integración con las dos formas no lineales y demostró resultados equivalentes sustituyendo la primera ecuación en la ecuación 2-32 y manipulándolo se obtiene:

$$\sum_{l \in \text{loop}} \frac{L}{gA} Q_l^{t+\Delta t} - K_l Q_l^{t+\Delta t} |Q_l^t|^{n-1} \Delta t = \sum_{l \in \text{loop}} \frac{L}{gA} Q_l^t$$

La ecuación anterior se escribe para cada red cerrada o pseudo red como en la teoría lineal de red modificada para flujo permanente. Las ecuaciones de los nodos se escriben en términos del gasto en las tuberías en el tiempo $t + \Delta t$ dando k ecuaciones adicionales. El sistema de ecuaciones lineales es resuelto para las razones de caudales en el tiempo $t + \Delta t$. Una vez que esos caudales han sido calculados, un nuevo sistema de ecuaciones lineales para el siguiente paso debe ser formulado. La variación de la demanda en el tiempo se introduce en las ecuaciones de los nodos. La escala de tiempo puede afectar la convergencia de los resultados, pero no es una regla general.

2.2.2.2. OTRAS FORMULACIONES PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA

Wood et al (1990) expresaron las ecuaciones de la red (método de ajuste simultáneo de la red) para flujo gradualmente variado y compararon su método con Simulación de Periodos Extendidos y modelos transitorios. Más recientemente, Ahmed y Landsey (1999) formularon las ecuaciones de las tuberías (método híbrido o de gradiente) para flujo gradualmente variado. La ecuación 2-31 fue escrita para una sola tubería y la derivada del tiempo fue aproximada por una diferencia hacia atrás explícita, se combinó con el balance de la ecuaciones nodales, y formó un sistema no lineal de las ecuaciones de la tuberías que puede ser resuelto para el gasto de la tubería y las cargas nodales utilizando un método basado en el algoritmo de gradientes.

2.3. TIPOS DE MODELOS

Es posible realizar una clasificación de los modelos con base en el objetivo o criterios que se establezcan, véase la Tabla 2-1.

Tabla 2-2. Clasificación de los modelos, con base en el objetivo o el criterio.

Objetivo o Criterio	Clasificación	
Aplicación	Modelos de planificación	Modelos operacionales
Grado de detalle	Modelos estratégicos o arteriales	Modelos detallados
Variación en el tiempo	Modelos estáticos	Modelos dinámicos
Variables del sistema	Modelos hidráulicos	Modelos de calidad del agua

En la presente tesis se propone mejorar los datos de entrada que mejoren los resultados en los modelos hidráulicos, por ende este capítulo se enfocará en la descripción de éste.

2.4. MODELOS HIDRÁULICOS

El primer paso antes de analizar y diseñar una red de distribución, por medio de un programa computacional, es representar la configuración geométrica y física del sistema de tal modo que pueda ser reconocido por el programa. Generalmente para representar la geometría del sistema se utiliza la notación de nodos o crucesos interconectados. En este caso, los enlaces representan las secciones individuales de tubería con características geométricas y físicas definidas (longitud, rugosidad y diámetro), y los crucesos o nodos son los puntos de conexión de una o varias tuberías donde se introduce la elevación y gasto.

Para el caso de dispositivos adicionales de la red como tanques, bombas, tanques, deben ser igualmente identificados y definidas sus características físicas, geométricas, hidráulicas y de operación. Una vez especificados todos los datos necesarios para el programa, deberán introducirse en un formato compatible con el programa.

2.4.1. ETAPAS EN LA ELABORACIÓN DE UN MODELO HIDRÁULICO

Las fases para elaborar un modelo hidráulico son las siguientes:

1. Determinar el tipo de cuestiones que el modelo ayudará a resolver/responder;
2. Representar los componentes de la red de distribución “real”, en términos adecuados para su utilización por el modelo implementado;
3. Recopilación de información para caracterizar los componentes incluidos en el modelo (catastro confiable de la red de distribución, conocimiento del estado de las válvulas y su operación -abiertas y cerradas-, número suficiente de mediciones de presión, caudal y niveles -en caso de existir tanques- con el objetivo de conocer el comportamiento hidráulico de la red);
4. Esqueletización de la red, esto es la simplificación de la red de tuberías, según el uso y la información disponible;
5. Análisis y asignación de consumos registrados. Se trata de incorporar dentro del modelo, las demandas en los puntos de consumo para cada período de tiempo analizado.

2.4.1.1. ESQUELETIZACIÓN DE LA RED

La esqueletización de la red consiste en simplificar la red de distribución, y esquematizar los elementos restantes de la red. Generalmente este concepto se traduce a lo siguiente:

1. Unificación de nodos próximos, donde debido a la corta longitud de las tuberías que los unen, se tendrá un mismo valor de la presión;
2. Eliminación de ramificaciones y demandas, sustituyéndolas por su consumo en el punto de conexión con la red, Ilustración 2-2.
3. Eliminación de tuberías de diámetro pequeño.

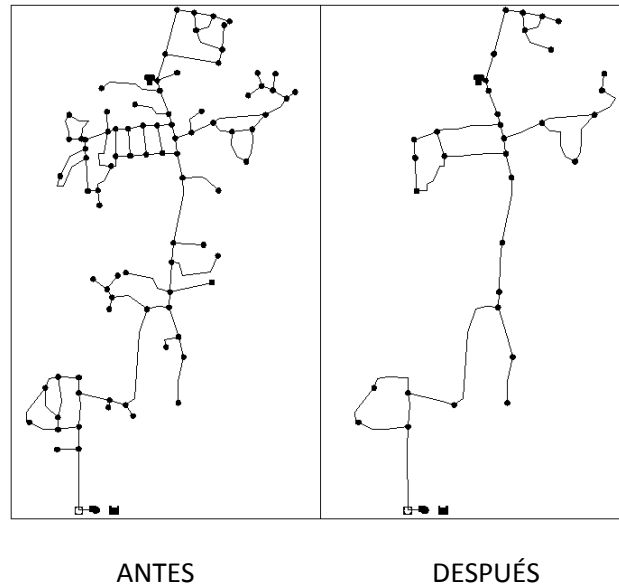


Ilustración 2.2 Proceso de esqueletización de una red.

Considerando al menos una de las tres circunstancias, conlleva a tener un grado de incertidumbre en los resultados finales.

2.4.1.1.1. ESTACIONES DE BOMBEO EN LA ESQUELETIZACIÓN

En el caso de flujo permanente, las estaciones de bombeo se pueden incluir dentro de un modelo como un punto de inyección de caudal a la red de distribución.

Si el bombeo se realiza a un depósito o tanque de regularización se podrá modelar la estación de bombeo como dicho tanque, la altura piezométrica en el nodo de la bomba corresponde con la del depósito.

Para el caso en que el tanque funcione como excedencias, la presión en la red depende del caudal que entra y sale del tanque, por lo que es importante incluir la estación de bombeo. Asimismo en caso de tener un bombeo directo hacia la red, se deberá incluir la estación de bombeo.

2.4.1.2. ESTUDIO DE CONSUMOS Y ASIGNACIÓN DE DEMANDAS

La confiabilidad de un modelo de simulación hidráulica, cuando éste representa una red de distribución en servicio, depende del ajuste que se realice a los parámetros que definen el comportamiento de los diferentes elementos. Los parámetros de mayor importancia dentro de una simulación son tres:

1. Diámetro de las tuberías;
2. Rugosidad de las tuberías;
3. Demanda en los nodos de consumo.

El diámetro y la rugosidad son parámetros con una incertidumbre elevada, por diversos factores, como la antigüedad de la red, topología, composición química del agua, sin embargo es la demanda en los nodos de consumo, la variable que más incidencia tendrá en la respuesta del modelo. Por lo tanto es importante al realizar una simulación hidráulica conocer cuánta agua se va a usar, dónde están localizados los puntos de consumo y cómo varía el consumo en función del tiempo.

Para resolver estos cuestionamientos, inicialmente se realiza un estudio de demanda promedio, sobre la cual se aplicarán los coeficientes de variación horaria para el caso de las simulaciones estáticas y las curvas de variación horaria de la demanda en simulaciones de períodos extendidos.

En el modelo estático se consideran los coeficientes de variación horaria. Generalmente se analiza la situación de máximo consumo, donde se presentan las presiones más bajas en la red de distribución, y la de mínimo consumo, cuando las presiones son mayores y se pueden producir fallas en las tuberías.

Para el modelo dinámico se considera una curva de variación horaria de la demanda, por ende es más difícil la asignación de demandas al modelo. Para su utilización en simulaciones de período extendido, la curva de variación de la demanda se discretiza en intervalos regulares de tiempo, normalmente de una hora de duración, Ilustración 2-3.

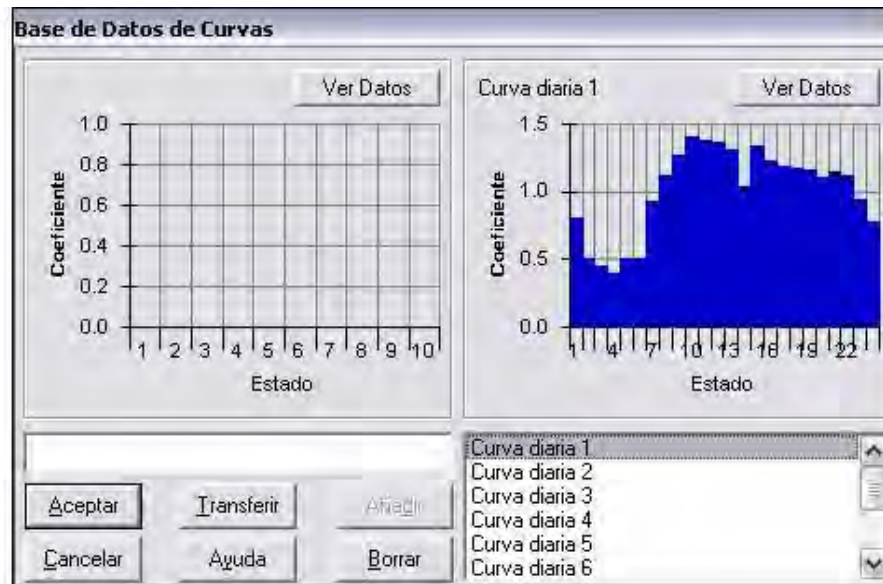


Ilustración 2-3. Curva de la variación horaria de la demanda.

2.4.1.2.1. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA

La información requerida para determinar la demanda promedio se obtiene de diferentes fuentes de información.

Primeramente se utilizan los registros del propio abastecimiento relacionados con la producción de agua en las fuentes, caudal o volumen de agua bombeado, caudal inyectado en los diferentes puntos de alimentación de la red, variación de niveles en tanques o depósitos de almacenamiento o regularización. En México solo el 70 % del agua suministrada se mide (CONAGUA, 2007); sin embargo, esta información no suele ser suficiente ya que a pesar de tener macromedidor en muchas ocasiones éstos no funcionan adecuadamente o simplemente no operan.

Por otro lado se obtienen las lecturas de los micromedidores de los usuarios que sirven de base para la facturación. Estos volúmenes facturados podrán ser convertidos a caudales promedio. Esta información no suele ser suficiente ya que sólo el 60 % del agua consumida se mide en México (CONAGUA, 2007).

La información obtenida debe ser convenientemente tratada para determinar las demandas en los nodos de consumo. Existen dos posibles formas de proceder:

1. De arriba hacia abajo: este procedimiento supone comenzar desde las fuentes de abastecimiento y descender hasta las demandas nodales. Con el conocimiento sobre la producción de agua y los principales consumidores de agua, el resto de la demanda es desagregada entre el resto de los consumidores.
2. De abajo hacia arriba: este procedimiento parte de los registros individuales de facturación de los usuarios, agregando diferentes consumos para obtener las demandas nodales.
3. Ambos métodos están basados en conceptos generales de balance de masa. Sin embargo, la mayoría de los métodos empleados para asignar la demanda a un modelo son una combinación de ambos procedimientos. De hecho, la determinación del agua no contabilizada, se calcula como la diferencia entre la producción de agua y el volumen de agua medido a los usuarios, repartiendo posteriormente dicha diferencia entre los nodos según un determinado criterio de asignación, ver Ilustración 2-4.

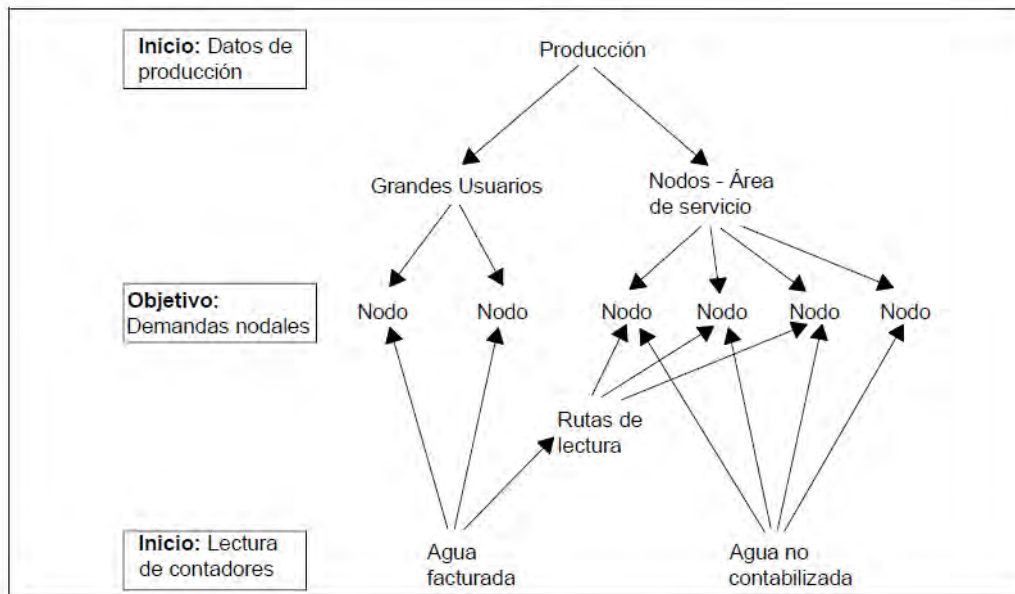


Ilustración 2-4. Estimación de la demanda o carga del modelo, Hernández, 2009.

2.4.1.2.2. TIPOS DE CONSUMO

En la asignación de consumos existen dos tipos:

1. **Contabilizados:** son aquellos que son controlados tanto en valor como en ubicación. Generalmente provienen de las facturaciones de los usuarios al servicio. El proceso de asignación de demandas consiste en pasar los consumos facturados de cada usuario a la demanda en el nodo del modelo. El método dependerá de la estructura en la información por parte del organismo operador.
2. **No contabilizados:** son los que quedan fuera del control del organismo operador. Generalmente generados por errores de lectura, fugas en la red de distribución, errores en los equipos de medición de caudal, tomas clandestinas, entre otros.

2.4.1.2.3. CRITERIOS DE ASIGNACIÓN

Existen diferentes formas de realizar la asignación de demanda cuando se parte de las facturaciones de los usuarios, las cuales se citan a continuación.

2.4.1.2.3.1. Asignación nodo por nodo

Este proceso consiste en relacionar cada usuario con un nodo del modelo y asignar su consumo a dicho nodo, buscando siempre referirlo al más cercano, o con el nodo que se puede considerar que abastece al usuario.

En la Ilustración 2-5., las líneas discontinuas representan las fronteras entre asociaciones de nodos, por ejemplo, al nodo J-4, le corresponden siete viviendas, un colegio y un edificio comercial (García, 2003).

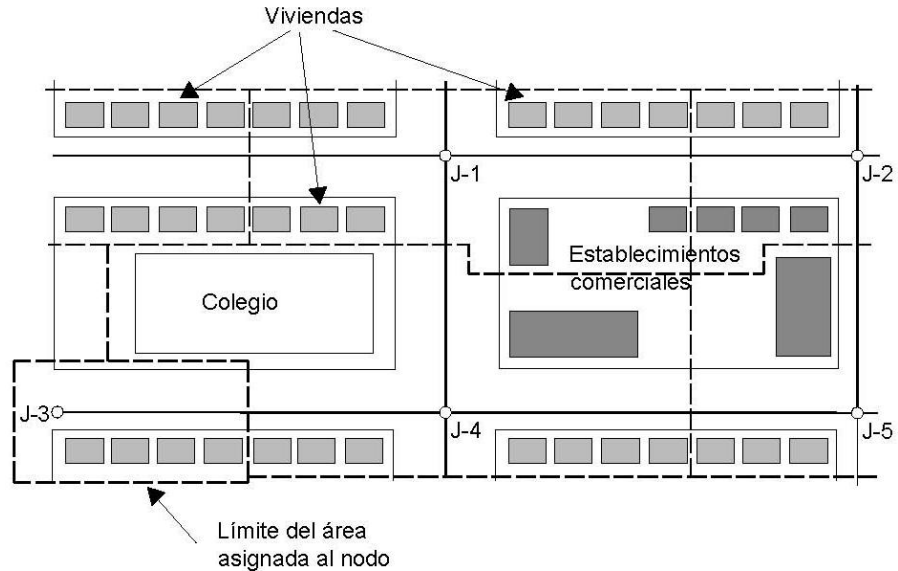


Ilustración 2-5. Asignación de demandas a los nodos de consumo.

2.4.1.2.3.2. Asignación de consumos por sectores

El proceso consiste en sumar el consumo de todos los usuarios que quedan dentro de un sector [Martínez, 1994], que se hacen coincidir con la planimetría o malla del modelo, obteniendo el consumo total del sector, para posteriormente repartirlo en partes iguales a los nodos que se quedan incluidos dentro del sector.

2.4.1.2.3.3. Asignación de consumos unitarios por calle

Este proceso inicia identificando las tuberías de la red de distribución y calculando los metros lineales de éstas dentro de las calles. Por su parte, a través de los datos de los usuarios del servicio se obtiene el consumo por calle y el consumo unitario por calle.

Este tipo de asignación tiene bastante precisión por considerar la ubicación real de las tuberías en la red.

2.4.1.2.4. DISTRIBUCIÓN DE DEMANDAS NODALES

Generalmente la distribución de la demanda en los nodos está relacionada de manera directa al tipo de análisis hidráulico. Demanda media para estado permanente o una variación temporal en los nodos para periodos extendidos.

2.4.1.2.4.1. Distribución espacial de la demanda

Se considera una distribución espacial cuando el análisis hidráulico se realiza para un instante de tiempo, es decir, las demandas exigidas a la red responden a una distribución media en el espacio y es constante en el tiempo.

2.4.1.2.4.2. Gasto por unidad de área

Si solamente se conoce la superficie que atenderá y todavía no se ha notificado, el gasto total se divide por el área total neta. El gasto unitario que resulta se multiplica por el área neta que sirve cada nodo, para lo cual el área por servir se divide en áreas de influencia para los diferentes nodos, como se muestra en la Ilustración 2-6.

Los gastos de los grandes consumidores concentrados, como industrias, hospitales, baños públicos, etc., se consideran en forma directa. Con este objetivo, en el esquema de la red se señalan como nudos en los puntos de ubicación de estos consumidores.

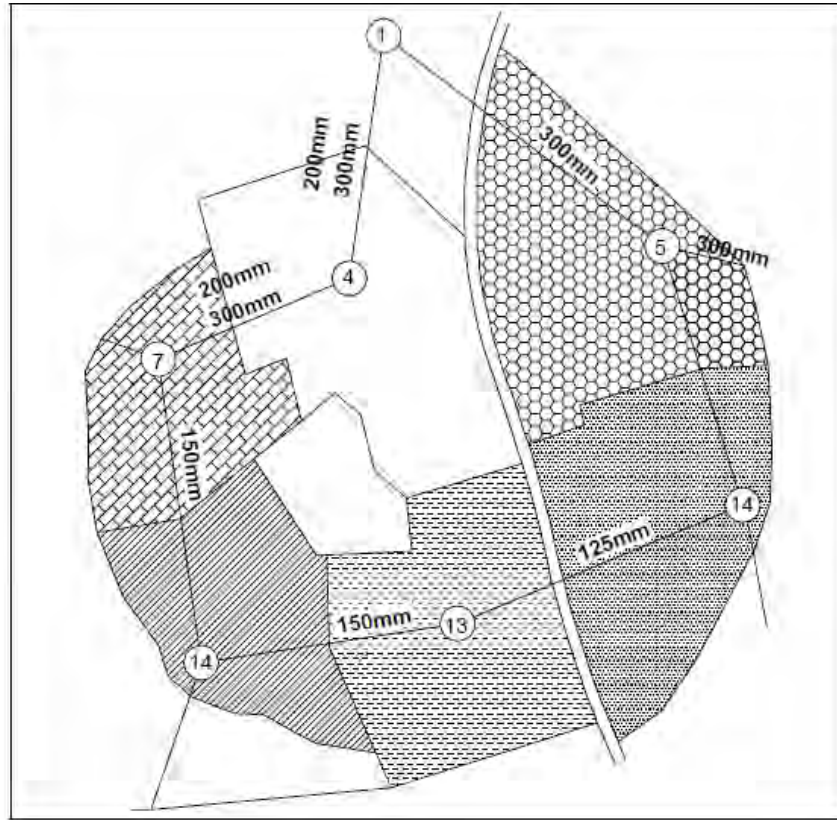


Ilustración2-6. Áreas de influencia de los nodos, CONAGUA, 2007.

2.4.1.2.4.3. Gasto por unidad de longitud

Cuando no se conocen con certeza las superficies que atenderá cada tramo, se divide el gasto total de la red entre la suma de las longitudes de todos los tramos. El gasto unitario resultante se multiplica por la longitud de cada tramo. Este procedimiento, aunque poco preciso, puede usarse en proyectos de redes para abastecer a zonas habitacionales. Sin embargo, en zonas industriales se recomienda utilizar los dos primeros métodos.

Después de aplicar el proceso así descrito a todos los tramos, se obtienen las demandas concentradas en los nodos como una suma de los consumidores concentrados y las aportaciones de demanda distribuida en los tramos. Este procedimiento es empleado en programas comúnmente aplicados como ScadRED.

2.4.1.2.5. RECOMENDACIONES EN LA ASIGNACIÓN DE CONSUMOS EN MODELOS MATEMÁTICOS

Los procesos de asignación de consumos anteriormente expuestos tienen una serie de recomendaciones. Dentro de éstas se deberán distinguir de acuerdo al tipo de simulación que se trate: estática y dinámica.

2.4.1.2.5.1. Asignación de consumos en modelos estáticos

A continuación se describen una serie de recomendaciones en caso de considerar un modelo de simulación estática:

A través de los métodos mencionados anteriormente, se asigna una demanda media en los nodos del modelo que corresponde a un estado medio de demanda en la red de distribución.

En caso de considerar un enfoque estático, se deberá adaptar el estado medio de demanda en la red a la que se produce el instante de la simulación.

A su vez la demanda instantánea depende de varios factores como son:

- Tipo de consumo (comercial, doméstico, industrial, público)
- Nivel socioeconómico del usuario del servicio
- Hábitos de consumo

Las características anteriores muestran que existirán diferencias entre un sector de consumo y otro, incluso en nodos del mismo sector.

En caso de abordar problemas de diseño, el consumo medio será corregido por un coeficiente de variación máximo, dependiente de número de usuarios. Estos coeficientes máximos diarios u horarios son valores específicos de cada sistema de distribución. En México, a través de publicaciones emitidas por la Comisión Nacional del Agua como el *Manual de Datos Básicos*, [CONAGUA, 2004], se publicaron los valores de los coeficientes variación diaria y horaria, soportados a través de un estudio que incluyeron diferentes ciudades del país. Los resultados se presentan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Valores de los coeficientes de variación diaria y horaria, (CONAGUA, 2004).

CONCEPTO	VALOR
Coeficiente de variación diaria, CVd	1.40
Coeficiente de variación horaria, CVh	1.55

Sin embargo se recomienda que a través de los registros de producción de agua de las fuentes de abastecimiento y niveles en tanques del sistema analizado se determinen estos coeficientes para el sistema de distribución analizado.

2.4.1.2.5.2. Asignación de consumos en modelos dinámicos

Además de las recomendaciones anteriores, dentro de los modelos de simulación dinámica se deberá reproducir una curva de variación de la demanda en los nodos a lo largo de la simulación, ver Ilustración 2-7.. Por lo anterior se deberán atender las siguientes recomendaciones:

1. Para simular en cada instante el estado de demanda real en la red de distribución, se multiplica la demanda media de los nodos por un coeficiente que relacione el consumo instantáneo con el medio.
2. El proceso de asignación de cargas incluye también dentro de los nodos la variación de la demanda en cada uno de ellos.
3. La variación de la demanda para el consumo doméstico depende del nivel socioeconómico, hábitos de consumo, edad de los usuarios, etc.
4. La curva de la variación de la demanda difiere totalmente de una red de distribución a otra. Por lo anterior es conveniente realizar mediciones tendientes a caracterizar la curva que se introducirá dentro de un modelo de simulación.
5. En los usuarios del sector comercial e industrial, la curva de la variación está adaptada a los horarios de actividad. Dentro de éstos el consumo es prácticamente constante, mientras que fuera de ellos es nulo.
6. Las curvas de variación de la demanda varían en días laborables y festivos, de acuerdo a la estación del año, por lo que habrá que considerar esto en el momento de la simulación.
7. Las diferencias estacionales del consumo de agua están relacionadas con los cambios climáticos, tales como la temperatura y la precipitación.

Hay ocasiones en que existen usuarios cuyos patrones de demanda difieren significativamente del patrón de demanda típico asignado al grupo que pertenecen, sin embargo, la repercusión que tienen tales diferencias sobre el modelo resultan insignificantes. Caso contrario ocurre para otros usuarios, como son las industrias, donde los errores en el patrón de consumo pueden tener un impacto mayor sobre el modelo.

Normalmente entre mayor sea el consumo individual de un usuario, más importante será obtener una caracterización adecuada de su patrón de consumo respectivo.

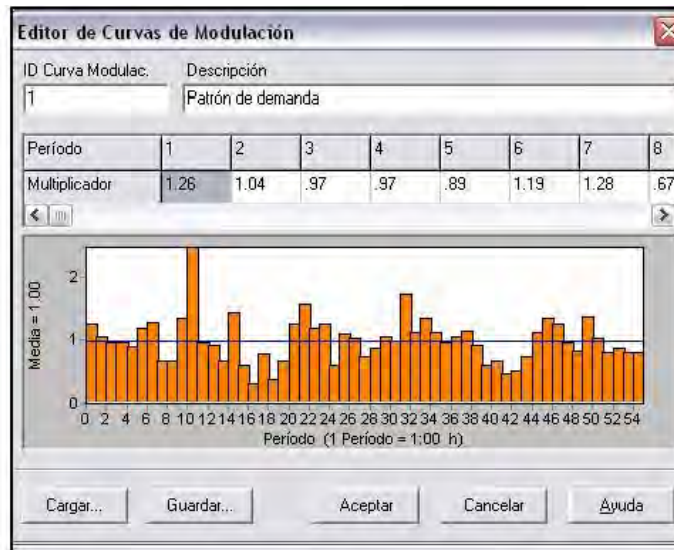


Ilustración 2-7. Editor de curva de variación o modelación de la demanda dentro del modelo EPANET.

2.4.1.2.5.3. Otros factores por considerar

El desconocimiento del valor y localización de los consumos no contabilizados como las fugas en la red de distribución, los errores en los micromedidores, caudal no contabilizado, entre otros, añaden incertidumbre al proceso de asignación de la demanda en los nodos. Sin embargo las fugas son el factor predominante en este rubro.

2.4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Después de elaborar el modelo este se debe calibrar, el proceso de calibración se representa como:

1. Identificar el uso del modelo;
2. Determinar estimaciones iniciales de los parámetros del modelo;
3. Recoger datos de calibración;
4. Evaluar resultados del modelo;
5. Calibrar el modelo y su sensibilidad.

Generalmente se siguen los siguientes pasos:

- Mediciones de presión y caudal, las cuales se realizan en algunos puntos de la red, para diferentes estados de carga;
- Ajuste del modelo. Se reproducen con el modelo los estados de carga de las mediciones. Se comparan los valores de presión y caudal medidos en la red con los obtenidos por el modelo de simulación hidráulico, y se ajustan los diferentes parámetros como el coeficiente de rugosidad de las tuberías, y la demanda.

Al final del proceso se obtiene un modelo hidráulico calibrado, que permitirá realizar simulaciones con cualquier estado de demanda en la red. Es importante mencionar que las redes de distribución sufren de constantes cambios, por esta razón el modelo hidráulico calibrado, deberá ser actualizado y recalibrado de forma periódica.

2.5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO HIDRÁULICO

Si bien no existe un criterio que pueda ser aplicado de forma universal, se tiene una serie de recomendaciones aplicables en otros Países [*Water Research Center (WRC)*, 1989].

Para modelos estáticos son los siguientes:

- Los caudales deberán coincidir hasta un 5% del caudal medido en campo. O bien, para caudales con tolerancia de 10% o menor, estos deberán representar menos de un 10% del total de la demanda.
- Las presiones deben coincidir hasta un 0.50 m o el 5% de la pérdida de carga para el 85% de las mediciones, hasta 0.75 m o 7.50% de la pérdida de carga para el 95% de las mediciones, y hasta 2 m o 15% de la pérdida de carga para el 100% de las mediciones.

2.6. ELECCIÓN DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

La elección del programa de simulación hidráulica depende de muchos factores, aquí se presentan los más significativos.

1. Se debe tener en cuenta que no se requiere de un programa con un costo muy elevado, cuando el nivel de confiabilidad del catastro de la red de distribución es bajo.
2. Se debe atender primeramente otras acciones en cuanto al manejo del agua en el sitio (actualización del catastro de tuberías y estado de válvulas, sectorización, reducción integral de pérdidas, entre otros) y posteriormente realizar la adquisición de un modelo de simulación que capture la información relacionada con la red de distribución.
3. Recordar que el sistema de distribución de agua se incluirá en el modelo y que para alcanzar un nivel confiable de calibración del mismo se deberán realizar un número importante de mediciones de caudal y presión. De lo contrario ningún programa por sofisticado y completo que sea, representará el comportamiento real de la red de distribución. Lo anterior trae como consecuencias malos resultados, inversión económica perdida y un modelo desaprovechado.
4. Considerar los modelos o programas comerciales gratuitos; estos favorecen en gran medida la inversión y cuida los recursos de la institución. Incluso algunos son compatibles con programas robustos, siendo esto una posibilidad de comenzar en este tipo de modelos, para posteriormente emigrar a un programa más completo. Lo anterior es de importancia porque se tiene la creencia de que entre más económico es más limitado. De

hecho la mayoría de los programas modernos parten del modelo gratuito como lo es EPANET®.

5. Se deberá revisar el costo por el tipo de asesoría o capacitación en línea o personalizada por parte de la empresa distribuidora del programa. Recordar que en la elección del tipo de programa se mantendrá en los años posteriores una estratégica relación con el distribuidor, que se traduce directamente en recursos económicos. Esto por las nuevas versiones y adelantos que pudiera en un momento dado tener el programa. Por lo anterior deberá elegir aquellos que tengan personal certificado en México preferentemente, con el objetivo de reducir asesorías extranjeras a precios elevados.
6. Elegir un programa con compatibilidad con otros programas de su tipo.
7. En algunos programas se tiene el código del programa, esto favorece la programación de nuevas aplicaciones futuras y con ello no dependerá del distribuidor del programa. O bien podrá adquirir únicamente módulos programados adicionales.
8. De acuerdo al nivel de detalle del proyecto se deberá elegir el programa comercial. Por ejemplo si únicamente se realizará un modelo de planeación, bastaría únicamente con alguna versión limitada o gratuita. En caso contrario si realiza un modelo de calidad del agua que llega a los usuarios, se debe elegir una versión elevada en el número de nodos o bien ilimitada. Esto se debe a que en este tipo de estudios se incluyen también las tuberías secundarias incrementando directamente el número de nodos.
9. En proyectos en los cuales se debe entregar planos con cuantificación de obra y piezas especiales, se recomiendan aquellos que trabajen bajo un entorno de AutoCAD .
10. La razón de incluir la tubería secundaria en los modelos de simulación de calidad del agua es porque en éstas, es donde se presenta los mayores cambios fisicoquímicos de ciertas sustancias como el cloro residual libre. La característica fundamental que favorece estos cambios son los tiempos de residencia altos, teniendo la oportunidad las sustancia de reaccionar con otras, originando el proceso de reacción con el volumen del agua, k_b y la paredes de la tubería k_w .
11. Para el caso de una simulación de la calidad del agua en una red de distribución se deberá revisar primeramente si el modelo tiene un módulo de calidad del agua. Posteriormente atender que tipo de simulación realiza. Los tipos de modelación son: estática y dinámica (períodos extendidos).
12. En caso de realizar un estudio preliminar de la calidad del agua, por ejemplo del comportamiento del cloro dentro de la red de distribución se puede emplear únicamente modelación estático. Por el contrario en caso de requerir conocer el comportamiento de una sustancia a través del tiempo dentro de las tuberías y tanques se deberá realizar una simulación dinámica (períodos extendidos).

3. ESTADO DEL ARTE NACIONAL E INTERNACIONAL

3. ESTADO INTERNACIONAL DEL ARTE

La modelación de los consumos por medio de pulsos rectangulares con escalas de tiempo cortas en redes de agua potable ha ido adquiriendo cada día mayor importancia.

Uno de los factores que ha provocado este interés, es el aporte que ha proporcionado la implementación de este esquema de consumo a la modelación de la calidad del agua, ya que con éstos se representa de mejor forma el flujo del agua en la red de distribución a través del tiempo y espacio, obteniendo un mejor modelo hidráulico que sirve como base para los modelos de calidad del agua; por ende los resultados son más confiables que los generados por métodos convencionales (usando como patrón de consumo la curva de la demanda horaria). De esta manera es posible determinar con mayor exactitud los sitios de la red donde se pueden presentar problemas, no sólo de carácter hidráulico sino también de calidad del agua.

3.1. **MODELO DE PULSOS RECTANGULARES DE POISSON**

En el 2003 Buchberger *et al* verificaron que el consumo doméstico a lo largo del tiempo sigue un proceso de Poisson. Este proceso representa cada consumo individual como un pulso rectangular con una altura (intensidad) “x” y un ancho (duración), ambos parámetros son aleatorios, esto se debe a que la ocurrencia de consumos varía considerablemente de una hora a otra a lo largo del día. Con base en este proceso se desarrollan modelos de simulación de consumo con Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP), que permiten generar series de consumo bajo ciertos criterios estocásticos. Las casas habitación consideradas en estos esquemas no tienen tinacos o cisternas; además cuentan con servicio continuo de agua potable.

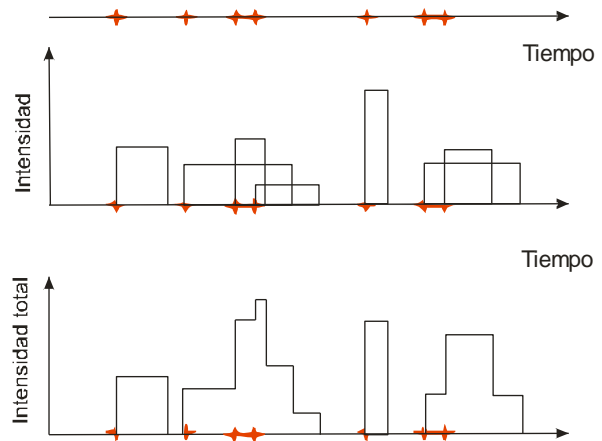
El método PRP se basa en cinco consideraciones.

1. Asume que los consumos promedio en los nodos son conocidos y su escala temporal presenta una base generalmente horaria;
2. Los consumos adoptan una secuencia de pulsos rectangulares;
3. La ocurrencia de los pulsos está gobernada por un proceso de Poisson, expresado por una tasa λ ;
4. A cada pulso se asigna una intensidad y duración aleatoria acorde con cierta distribución de probabilidades;
5. La intensidad y duración no sólo son mutuamente independientes, también los son del proceso de Poisson (Li, 2006), véase la Ilustración 3-1.

Las demandas arriban de forma aleatoria siguiendo un proceso de Poisson

Un pulso rectangular con intensidad y duración aleatoria está asociado con cada arribo

El consumo total en cualquier instante de tiempo, será la suma de los pulsos rectangulares coincidentes en este instante



→ Representa el inicio de pulso
 → Representa el fin de pulso

Ilustración 3-1. Representación esquemática del método de pulsos rectangulares de Poisson, PRP (Li y Buchberger, 2006).

Los parámetros presentados en la Tabla 3-1., son la base para obtener la información adecuada para generar las series de consumo.

Tabla 3-1. Parámetros básicos utilizados en los PRP.

Parámetros Básicos	Símbolo
Tasa de llegada o frecuencia en la ocurrencia de los pulsos individuales	λ
Intensidad promedio de los pulsos	$\mu_{\bar{x}}$
Varianza de la intensidad de los pulsos	$Var(\mu_{x_i})$
Duración promedio de los pulsos	$\eta_{\bar{x}}$
Varianza de la duración de los pulsos	η_{x_i}

La obtención de estos parámetros con intervalos de tiempo muy pequeños (un segundo) proporcionan la evolución del consumo doméstico, sin embargo el recurso humano, económico y tecnológico requerido puede limitar al método y dificultar su aplicación en proyectos de investigación o de ingeniería que involucren diseño y análisis de redes de distribución.

Por esta razón investigadores han desarrollado técnicas orientadas a la estimación indirecta de los parámetros básicos de registros de la demanda con intervalos más largos, destacando la desagregación espacial y temporal (Alcocer *et al*, 2006; Guercio *et al*, 2001; Rodríguez-Iturbe *et al*, 1984).

3.2. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL PROCESO DE POISSON

La estimación de los parámetros, generalmente, se basa en el planteamiento de una función objetivo, que expresa la relación entre los momentos estadísticos de la serie observada y los momentos teóricos del modelo de consumo minimizada a través de técnicas de programación no lineal, obteniendo a partir de ello los parámetros deseados. La diferencia entre cada una de la técnicas empleadas para la obtención de estos parámetros es el tipo de distribución de probabilidad que se asume para gobernar el comportamiento de algunos parámetros, por ejemplo la duración e intensidad promedio de los pulsos; y por el proceso estocástico que se emplea para formular los momentos teóricos involucrados.

Los procesos estocásticos empleados son: Ruido Blanco de Poisson (Poisson *White Noise*), Pulsos Rectangulares Markovianos (*Rectangular Pulses Markovian*) y Ruido Blanco de Neyman-Scott (Neyman-Scott *White Noise*).

3.2.1. EL PROCESO DE NEYMAN-SCOTT

El proceso de Neyman y Scott, originalmente se desarrolló para describir la distribución de las galaxias en el espacio (1958). Actualmente ha llegado a representar un gran número de fenómenos físicos, biológicos y sociales (Bahaa et al, 1983).

Como ejemplo de la gran diversidad de fenómenos en las que se puede emplear el esquema de Neyman- Scott, se citan algunos artículos característicos de cada área en donde se ha empleado el esquema de Neyman-Scott.

1. En geofísica, D. Vere-Jones et al, 1966, *"A statical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand, Part II. Time series analysis"*
2. En neurofisiología, J. Opt. Soc. Amer., vol 71, pp.771-776, 1981, *"intervenient-time statistics for shot-noise driven self-exciting point processes in photo detection"*
3. En Ingeniería eléctrica, B.E.A. Saleh et al, 1982, para la detección de fotones y partículas, *"Multiplied Poisson noise in pulse, particle, and photon detection"*.
4. En física, M.C. Teich et al, 1983, *"Fluctuation properties of multiplied-Poisson light: Meausurement of the photon-counting distribution for radioluminescence radiation from glass"*.
5. En Riego, J.Ramírez; R. Bras, 1985, *"Conditional Distribution of Neyman-Scott Models for Storm Arrivals and Their Use in Irrigation Scheduling"*.
6. En hidrología A.Marroquín et al, 1994, *"Neyman-Scott Cluster Model for Daily Rainfall Processes in Lower Extremadura (Spain): Rainfall Generating Mechanisms"*.
7. En ecología, R. Plenge, 1995, *"An estimating function approach to interference for inhomogeneous Neyman-Scott processes"*.
8. En hidrología Enrique Ortiz y Rafael García Bartual, *"Modelación espacio temporal del evento"*
9. En hidrología, Santiago Salsón Casado y Rafael García Bartual, 1998, *"Desagregación de lluvias para aplicaciones en simulación de sistemas de recursos hidráulicos"*.

Con base en lo anterior y debido a que el consumo de agua depende de las conductas sociales, biológicas y se presenta de forma aleatoria, resulta apropiado emplear el esquema de Neyman-Scott para obtener el patrón de consumo del agua, esperando de esta forma obtener un comportamiento hidráulico en la red más apegado a la realidad que al utilizar el esquema convencional.

3.3. ALCANCES DEL ESQUEMA NEYMAN-SCOTT RECTANGULAR PULSES MODEL (NSRPM) EN LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Se ha demostrado que los procesos de Ruido Blanco de Poisson y Pulsos Rectangulares Markovianos no cumplen con la condición de trabajar con diferentes escalas de tiempo y simultáneamente obtener resultados favorables en cuanto a la estimación de parámetros se refiere (Alcocer-Yamanaka, 2007). Para suplir estas carencias en el 2007 Alcocer-Yamanaka validó un método basado en la técnica de Neyman-Scott (1958) y el modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson (PRP), éste estima los parámetros básicos necesarios para generar las series de consumo.

Este método permite las siguientes bondades:

1. Eliminar el error generado por la agregación espacial (debido que se realiza con datos medido de los propios domicilios)
2. Medir con intervalos de registro mayores a un segundo conservando la precisión en la estimación de los parámetros;
3. Ampliar la aplicabilidad de métodos de generación de consumo como el PRP;
4. Reducir considerablemente el costo asociado a la medición del consumo doméstico instantáneo;
5. Realizar cálculos hidráulicos y de calidad del agua con mayor precisión a través de la introducción de las series generadas de consumo en los modelos de redes.

4. ENFOQUE TRADICIONAL Y ESTOCÁSTICO EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO

4. ENFOQUE TRADICIONAL Y ESTOCÁSTICO EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO

Uno de los parámetros más difíciles de estimar al modelar redes de distribución de agua potable, es el consumo doméstico. Se ha demostrado que éste sigue un proceso estocástico, y es posible caracterizarlo a través de pulsos rectangulares, con cierta intensidad, duración y apego a una frecuencia de arribo; todo ello a través de esquemas estocásticos como Neyman-Scott Rectangular Pulses Model, NSRPM, (Neyman y Scott, 1958; Rodríguez-Iturbe, 1985, 1987; Entekhabi y Bras, 1990 y Alcocer-Yamanaka, 2007).

El esquema de NSRPM se basa en la solución de un problema de optimización no lineal, que involucra momentos teóricos que representan las series sintéticas (equiprobables), y los momentos observados (mediciones de campo) que establece estadísticamente la serie medida.

Se ha publicado la metodología y la validación inicial del proceso aplicado al consumo doméstico (Alcocer-Yamanaka et al, 2007), así como la comparación inicial entre los enfoques tradicional y estocástico (Arreguín y Alcocer-Yamanaka, 2010). Sin embargo, actualmente no se ha realizado el ejercicio de combinar ambos enfoques (tradicional y estocástico) involucrando la validación en una red esquelizada y considerando la agregación espacial y temporal.

4.1. ENFOQUE TRADICIONAL EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO

El enfoque tradicional considerando en el consumo la curva de variación horaria de la demanda, esta curva es una síntesis de mediciones realizadas de consumos domésticos y comerciales. Estas mediciones se clasificaron con base en el nivel socioeconómico (Bajo, Medio y Alto) y del análisis de los resultados obtenidos al comparar los datos registrados en los medidores, colocados aleatoriamente, con los datos del agua suministrada al distrito se obtiene la Curva de la Variación Horaria de la Demanda.

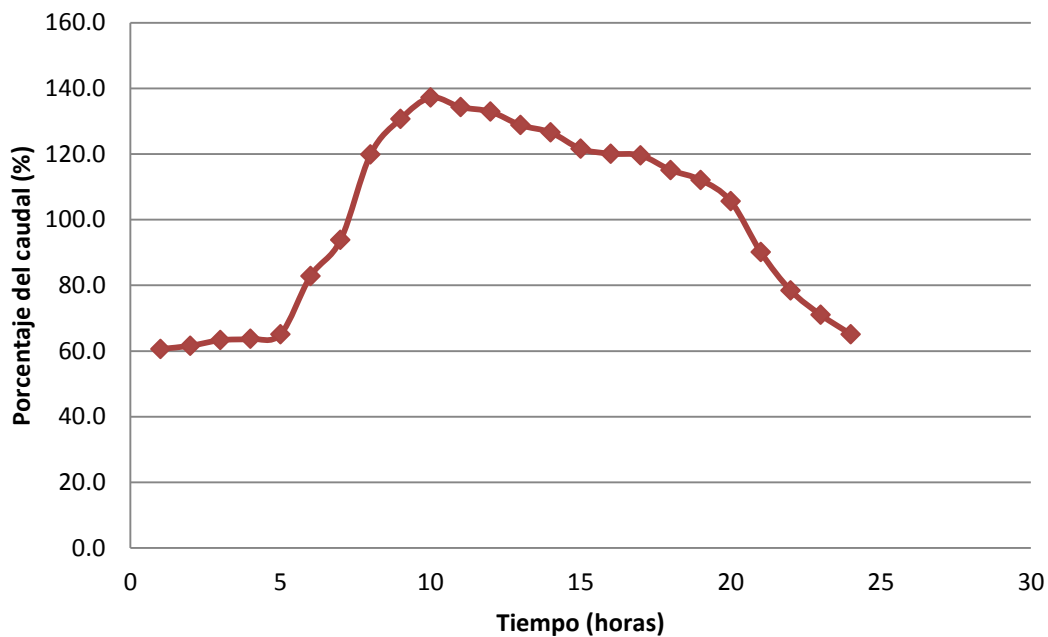
El estudio se realizó en las siguientes ciudades de la República Mexicana: Aguascalientes, Coatzacoalcos, Córdoba, Martínez de la Torre, Perote, Xalapa, Veracruz, Tapachula, Tuxtla Gutiérrez, Oaxaca, Manzanillo, Colima, Ciudad Obregón, Guaymas, Hermosillo, Mérida, Morelia, Zacapu, Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexicali, Tijuana, Ensenada, Tecate, Acapulco y Zacatecas.

Los resultados se presentaron en año de 1994 y los valores derivados del mismo obtenidos para el trazo de la curva se presentan a continuación:

Tabla 4-1. Valores obtenidos para el trazo de la Curva de Variación Horaria de la Demanda (Ochoa et al, 1994).

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda Horaria (%)	60.6	61.6	63.3	63.7	65.1	82.8	93.8	119.9	130.7	137.2	134.3	132.9
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Demanda Horaria (%)	128.8	126.6	121.6	120.1	119.6	115.1	112.1	105.6	90.1	78.4	71.0	65.1

Curva de la variación horaria de la demanda



Gráfica 4-1. Curva de variación horaria de la demanda para la República Mexicana (Ochoa et al, 1994).

Es importante mencionar que la metodología empleada para el trazo de la curva, incluye los consumos de los usuarios y las fugas dentro de la red analizada. Asimismo se observa que la curva es suavizada, lo cual no ocurre en la realidad al compararla con mediciones continuas de los consumos de una casa-habitación (Alcocer-Yamanaka y Arreguín, 2007)

4.2. ENFOQUE ESTOCÁSTICO EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO

El avance de la tecnología en la medición de variables como el caudal dentro de las tuberías, da la posibilidad de obtener registros con intervalos de tiempo menores de un segundo (Tzatchkov y Alcocer-Yamanaka, 2005), tiempo menor al necesario en ciertas aplicaciones para representar fielmente el consumo doméstico. Esta información facilita emplear modelos estocásticos para representar el consumo doméstico.

Estos modelos estocásticos inicialmente se utilizaron en la estimación de precipitación fluvial a diferentes escalas temporales, con base en la información diaria. Las series generadas tienen parámetros estadísticos similares o idénticos a las series originales (observadas), tales como la media, varianza, covarianza y la distribución de probabilidad.

Dado que el consumo doméstico sigue un proceso estocástico de punteo, los modelos estocásticos pueden ser utilizados en la simulación del consumo doméstico. En este rubro se han destacado los trabajos desarrollados por Buchberger *et al* (2003), Alvisi (2003) y Alcocer-Yamanaka (2007).

La ventaja de estas técnicas, es que trabajan con diferentes intervalos de registro de los datos observados, representan la evolución de los consumos domésticos y tienen un mayor apego al comportamiento real de los usuarios del sistema. La estimación de los parámetros y por ende la generación de series sintéticas, permite minimizar la información que sería necesario recabar con la medición de los consumos domiciliarios.

El método que se utilizará para la generación de la series sintéticas de consumo es el propuesto por Alcocer-Yamanaka (2007), basado en el esquema de Neyman- Scott.

4.2.1. MODELO DE PULSOS RECTANGULARES NEYMAN-SCOTT APLICADO EN LA MODELACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO

Las ecuaciones que gobiernan el proceso $Y_i^{(h)}$ (intensidad acumulada en el lapso h), de acuerdo con Rodríguez-Iturbe *et al* (1987) y Enthekabi *et al* (1989) se define de la siguiente manera:

$$E\left[Y_i^{(h)}\right] = \frac{\lambda}{\eta} \mu_c \mu_x h \quad 4-1$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[Y_i^{(h)}] = \lambda \eta^{-3} (\eta h - 1 + e^{-\eta h}) & \left\{ 2\mu_c E(X^2) + E(C^2 - C) \mu_x^2 \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right\} \\ & - \lambda (\beta h - 1 + e^{\beta h}) E[C^2 - C] \mu_x^2 \left[\frac{1}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \right] \end{aligned} \quad 4-2$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[Y_i^{(h)} + Y_{i+k}^{(h)}] = \lambda \eta^{-3} (1 - e^{-\eta h})^2 e^{-\eta(k-1)h} & \left\{ \mu_c E(X^2) + \frac{1}{2} E(C^2 - C) \mu_x^2 \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right\} \\ & - \lambda (1 - e^{\beta h})^2 e^{-\beta(k-1)h} \frac{1}{2} E[C^2 - C] \mu_x^2 \left[\frac{1}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \right] \quad \text{para } k \geq 1 \end{aligned} \quad 4-3$$

Donde las variables representan los siguientes parámetros:

$Y(t)$, Volumen acumulado (suma del volumen de todos los pulsos en un tiempo t ;

$X_u(\tau)$, Caudal o gasto asociado a un pulso (se mide en volumen por unidad de tiempo);

$N(t)$, Número de ocurrencias dentro del proceso de Poisson referido al inicio condicional del evento;

μ_c , Número de pulsos que se presentan dentro de un tiempo t ;

λ^{-1} , Tiempo promedio entre dos eventos;

β^{-1} , Tiempo promedio entre cada pulso individual y el origen del evento;

η^{-1} , Duración promedio de los pulsos;

μ_x , Intensidad promedio de los pulsos;

h , Intervalo de tiempo de agregación/desagregación analizado.

Definidas las expresiones del esquema de NSRPM, se formula la función objetivo:

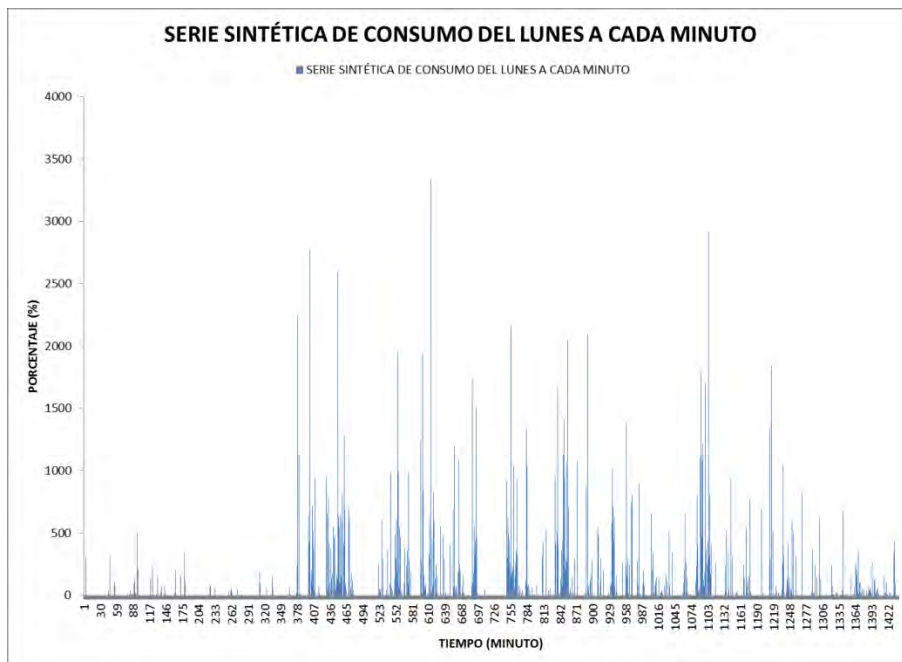
$$Z = \left[\left(\frac{F_1(\xi)}{F'_1} - 1 \right)^2 + \left(\frac{F_2(\xi)}{F'_2} - 1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{F_n(\xi)}{F'_n} - 1 \right)^2 \right] \quad 4-4$$

Donde F'_1, F'_2, \dots, F'_n , son los valores de los momentos observados, es decir, la media, varianza y correlación lag-1, entre otros, Por su parte F_1, F_2, \dots, F_n , son los momentos teóricos, funciones del vector de parámetros, $\xi(\lambda, \mu_x, \mu_c, \eta, \beta)$. Para este caso de aplicación en consumos domésticos, se consideró $n=3$, que representa la media, la varianza, y covarianza en la ecuación anterior.

Para resolver las ecuaciones planteadas, así como para la minimización de la función objetivo, se aplica una solución de ecuaciones simultáneas mediante un esquema de optimización.

En la formulación del esquema de Neyman-Scott se debe establecer el intervalo de análisis de cada parámetro buscando para la ejecución del esquema de optimización (en este caso el tiempo aplicado fue de un minuto). Se realiza a través de técnicas de programación matemática no lineal NLP (método de gradiente conjugado con derivadas centrales y estimación cuadrática), la minimización de la función objetivo, con lo cual se obtienen valores para cada uno de los parámetros de modelo de tal forma que la función objetivo sea minimizada.

Los resultados al aplicar este método se presentan en las gráficas 4-2 y 4-3.



Gráfica 4-2. Curva de la demanda para un domicilio en el día lunes, con el esquema de Neyman-Scott ($\Delta t=1$ min).



Gráfica 4-3. Curva de la demanda para un domicilio en el día lunes, con el esquema de Neyman-Scott ($\Delta t=30$ min).

Se observa que el comportamiento del consumo es muy diferente al presentado por la CVHD, Por otro lado se nota que en las gráficas se tiene que la curva corresponde al día lunes, esto significa que la curva de demanda que se obtiene es diferente para cada día (como es de esperarse en la vida diaria) y este proceso permite generar series de consumo diferentes para cada domicilio. Además de que el empleo del esquema estocástico permite la agregación y desagregación temporal.

4.3. VENTAJAS DEL ENFOQUE ESTOCÁSTICO

Se obtienen resultados con mayor realismo en el funcionamiento de una red de agua potable específica que al utilizar el enfoque tradicional (Arreguín y Alcocer-Yamanaka, 2010).

Los resultados obtenidos son más confiables para su empleo en la modelación de calidad del agua. (trabajo con futuro interesante).

Permite la estimación indirecta de las fugas en la red (Arreguín y Alcocer-Yamanaka, 2010).

Se puede aplicar a modelos de simulación hidráulica gratuitas (EPANET)

Permite planear la operación de la red, de tal forma que se puede ahorrar energía en el bombeo.

La estimación de las fugas en la red. Por la forma en que fue obtenida la CVHD, ésta incluye a las pérdidas físicas, y si se compara con las mediciones, puede notarse que la CVHD resulta inferior en más del 30% , en los intervalos de mayor demanda de los usuarios.

4.4. DESVENTAJAS DEL ENFOQUE ESTOCÁSTICO

El empleo del esquema de Neyman-Scott requiere que la serie inicial sea representativa de la zona en la que se va a modelar (se prefiere que sean datos medidos).

No se ha generado un criterio más práctico para la aplicación de enfoque estocástico al compararse con el enfoque tradicional.

No se ha validado el esquema estocástico para la generación de series de consumo empleando el esquema de Neyman-Scott, en redes esqueletizadas, es decir contemplando la agregación espacial y temporal.

5. SITIO DE APLICACIÓN

5. SITIO DE APLICACIÓN

Para realizar la validación del esquema de Neyman-Scott es necesario contar con la suficiente información de campo. Por ende se aplicaron los esquemas determinístico y estocástico en el sector Humaya, en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, ver Ilustración 5-1, ya que tiene la suficiente información de campo con que se necesita (Alcocer-Yamanaka y Tzatchkov, 2002, 2003, 2004; 2005, Alcocer-Yamanaka *et al*, 2004; Tzatchkov, *et al*, 2004; 2005, Alcocer-Yamanaka **et al**, 2007, 2008), entre la que destaca:

1. Mediciones de presión y caudal en fuentes de abastecimiento;
2. Medición de presión y caudal en puntos internos de la red de distribución de agua;
3. Medición del nivel en el tanque de regularización;
4. Medición de calidad del agua en fuentes de abastecimiento y puntos dentro de la red de distribución (cloro residual, COT, pH, Temperatura);
5. Medición de consumo intradomiciliario (90 domicilios, con intervalo de registro de un minuto y duración promedio de tres días).

5.1. FUENTES DE ABASTECIMIENTO

La zona tiene dos captaciones empleadas como fuentes de abastecimiento: la primera se compone de un sólo pozo que aporta un gasto promedio de 51 l/s, y la segunda de una batería de 8 pozos con capacidad máxima de 200 litros por segundo.

5.2. ESTRUCTURAS DE REGULARIZACIÓN Y CONTROL

Existen dos tanques de regularización: uno con capacidad de 3000 m³ y una cota de 82.63 msnm; y el otro con capacidad de 2000 m³, y cota de plantilla de 80.00 metros sobre el nivel del mar.

5.3. POBLACIÓN DE LA ZONA

La población en el año 2005 era de 85483 habitantes, se determinó con base en el número de tomas [20353 tomas en total] de cada colonia incluida dentro del sitio de aplicación del modelo, y al índice de hacinamiento por toma es de 4.20 hab/toma, de acuerdo a la información de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC).

5.4. FUGAS

Según reportes del organismo operador en la zona se tiene un porcentaje de pérdidas físicas del 30 por ciento, las cuales en su mayor parte se originan en tomas domiciliarias. La empresa *JBS Associates Inc*, realizó estudios de recuperación de agua durante los años 2000 y 2001, que valida el porcentaje de fugas mencionado.



Ilustración 5-1. Ubicación del Sector Humaya en la ciudad de Culiacán.

5.5. MODELO UTILIZADO EN EL “SECTOR HUMAYA”

Los datos geométricos de la red de abastecimiento de agua potable y otros necesarios para la modelación hidráulica como la población y el consumo, se introdujeron en el programa de cómputo EPANET®, ver Ilustración 5-2.

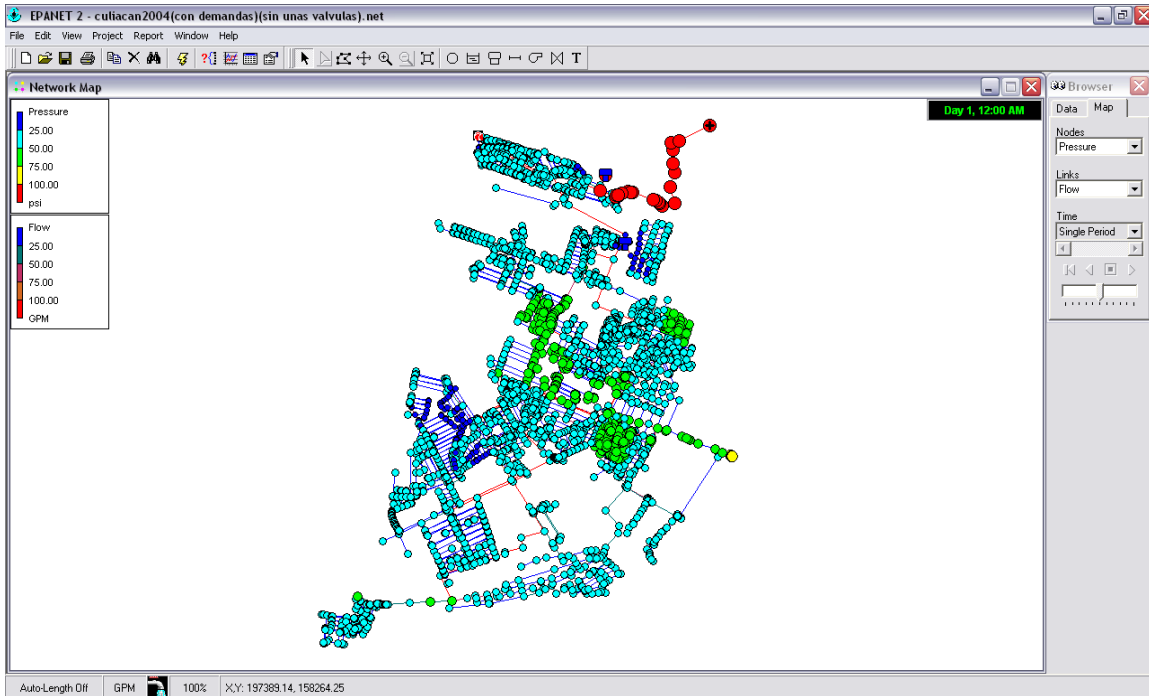


Ilustración 5-2. Red de distribución de la zona Humaya digitalizada dentro del sistema EPANET®.

Una de las ventajas de éste programa es su capacidad y versatilidad para analizar periodos extendidos, dado que en el esquema estocástico, se modelará el lapso de una semana, es decir 168 horas.

5.6. SITIOS SELECCIONADOS PARA COMPARAR RESULTADOS DE LOS DOS ESQUEMAS CON LAS MEDICIONES EN LA RED, Y LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Los resultados obtenidos con los esquemas determinístico y estocástico en redes esqueletizadas serán comparados con las mediciones de campo, de esta forma será posible establecer criterios en el empleo del esquema de Neyman-Scott en redes esqueletizadas. En la Ilustración 5-3, se muestra la ubicación de los nodos y tramos analizados dentro del sector Humaya, Culiacán, Sinaloa, aunque por razones de extensión de este trabajo, solo se discutirán algunos.

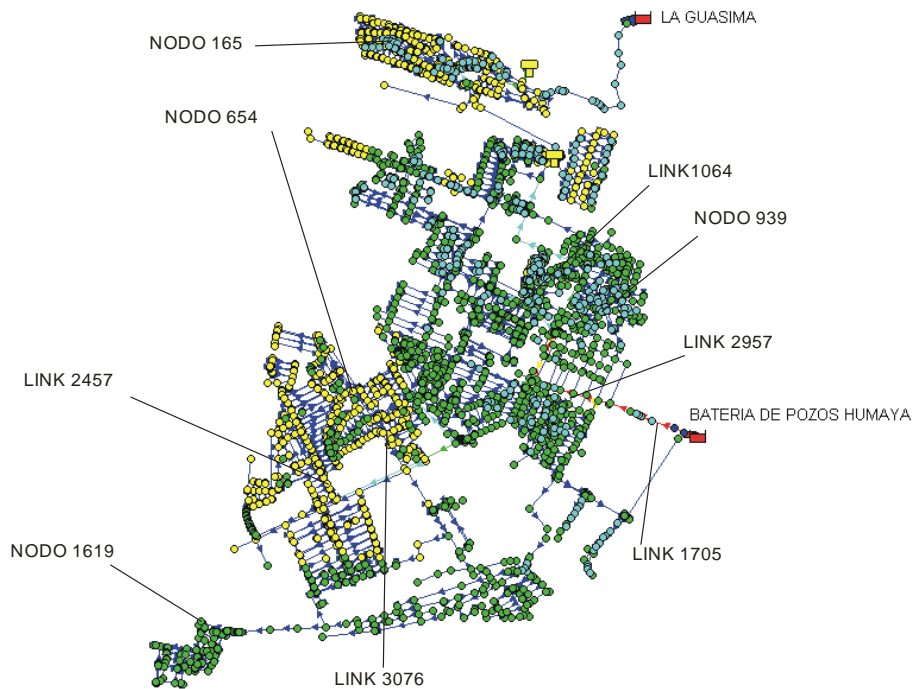


Ilustración 5-3. Ubicación en la red de nodos y tramos analizados.

6. APLICACIÓN DEL NRSPM

6. APLICACIÓN DEL NRSPM

6.1. METODOLOGÍA EMPLEADA EN TRABAJOS ANTERIORES

La metodología empleada por Alcocer-Yamanaka (2007) y posteriormente por Hernández (2009) para generar las series de consumo doméstico se resume y esquematiza en la Ilustración 6-1.

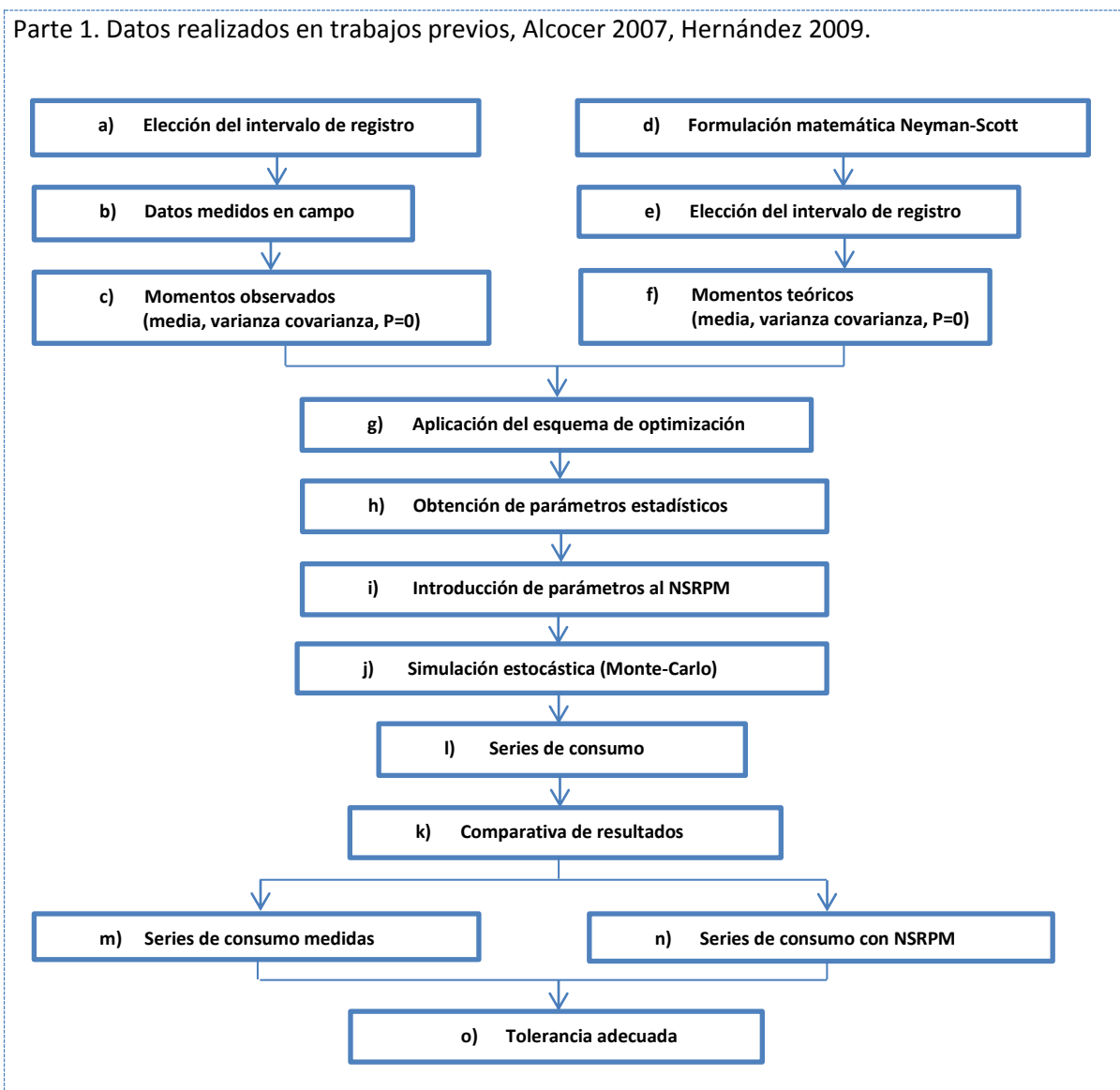


Ilustración 6-1. Metodología utilizada en la validación de las series de consumo empleando el esquema de Neyman-Scott, (Alcocer-Yamanaka, 2007).

A continuación se resume la acción realizada en cada paso:

- a) Se determina el intervalo de tiempo necesario para representar el consumo doméstico en los domicilios.
- b) Se registran las mediciones de los domicilios
- c) Se calculan los momentos de los datos registrados en los domicilios, media, varianza, covarianza y $P=0$.
- d) Se plantea el esquema de Neyman-Scott con las variables adecuadas para el consumo doméstico, ver ecuaciones 4-1, 4-2, y 4-3.
- e) Se elige el intervalo de duración en los pulsos a emplear en las simulaciones, la serie teórica debe representar el consumo doméstico, un intervalo muy grande genera que las series pierdan su congruencia con el consumo de los domicilios.
- f) Se plantean los momentos teóricos con base en la formulación del esquema de Neyman-Scott.
- g) Se formula la función objetivo con los momentos observados (datos) y los momentos teóricos (incógnitas), ver Ecuación 4-4.
- h) Se minimiza la función objetivo con el empleo de una técnica de programación no lineal, NLP (método de gradiente conjugado con derivadas centrales y estimación cuadrática), del resultado de la minimización se obtienen los parámetros teóricos, $\xi(\lambda, \mu_x, \mu_c, \eta, \beta)$.
- i) Se introducen los parámetros teóricos necesarios en el modelo computacional de generación de series de consumo aleatorio, se emplea el esquema de Neyman-Scott (Melor, 2003).
- j) Se elige de forma aleatoria una de las series generadas, dado que los consumos tienen este comportamiento. En el trabajo se consideran 50 series por domicilio, esto con el fin de que el promedio de los parámetros obtenidos de las series sintéticas tienda a los parámetros teóricos empleados en el esquema de Neyman-Scott.
- k) Se establecen las series de consumo que se emplearán en los nodos de la red de distribución en el modelo, es importante contemplar el nivel socioeconómico de los domicilios.
- l) Se simula la red de abastecimiento aplicando las series sintéticas en los nodos. Se determinan nodos específicos de consumo para comparar los datos medidos con los resultados obtenidos de modelos de simulación. Esto con el fin de validar la metodología empleada.
- m) Se extraen las series de consumo, de los nodos determinados para la comparación de los resultados, de la base de datos.
- n) De la simulación hidráulica, se extraen las series de consumo de los nodos determinados para la comparación de los resultados.
- o) Se determina la incertidumbre del modelo de simulación, por lo tanto se puede determinar la tolerancia.

6.2. EMPLEO DEL ESQUEMA DETERMINÍSTICO Y ESTOCÁSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Se realizaron mediciones de los parámetros hidráulicos de presión y caudal en fuentes de abastecimiento y puntos internos de la red de distribución de agua; de nivel en el tanque de regularización; y de consumo intradomiciliario en 69 domicilios, con un intervalo de registro de un minuto y duración promedio de tres días.

El programa de cómputo EPANET® se utilizó como plataforma para modelar el funcionamiento hidráulico en la red de abastecimiento de agua potable. Se introdujeron los datos necesarios, por ejemplo, la geometría de la red, la población y el consumo. La red de distribución se compone de 20360 nodos.

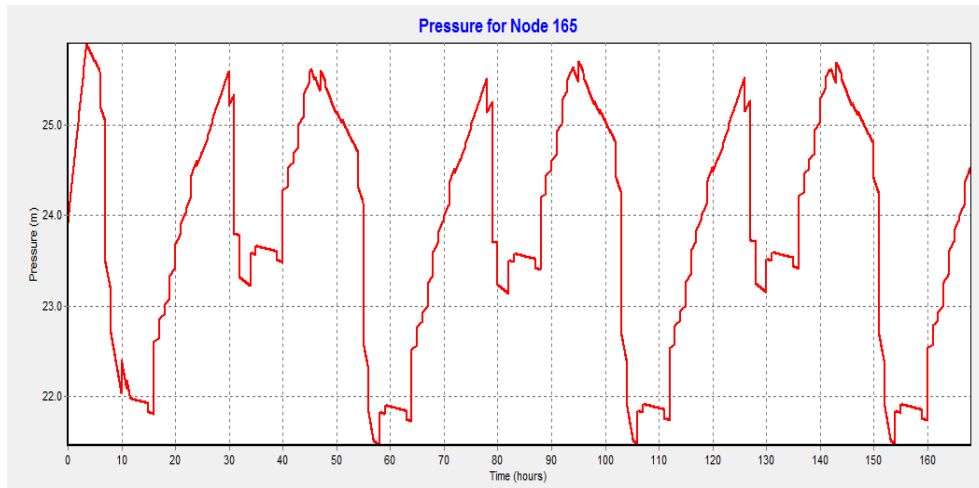
Las series empleadas en el modelo de simulación hidráulica tienen datos a cada minuto durante una semana, por lo tanto por cada nodo se introducen 10 080 datos.

El caudal asignado para generar la curva característica sintética del bombeo en la batería de pozos en el programa EPANET® fue de 104.22 litros por segundo (Alcocer-Yamanaka, 2007), ver ubicación en la Ilustración 5-3.

6.2.1. ESQUEMA DETERMINÍSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.

Se empleó la Curva de Variación Horaria de la Demanda para la República Mexicana, ver Ilustración 4-1, en los nodos de consumo doméstico establecidos en el modelo hidráulico desarrollado en EPANET. El lapso de simulación es de 168 horas.

La Gráfica 6-1 muestra las presiones calculadas con el programa EPANET en el nodo 165. Se observa la variación cíclica de la presión, debido a que se mantiene la demanda base y el patrón de comportamiento se introduce por medio de la Curva de Variación Horaria de la Demanda. Las presiones máximas y mínimas medidas en metros de columna de agua (mca), son: 26.00 y 21.00 mca, respectivamente.



Gráfica 6-1. Presión en el Nodo 165 para el escenario empleando la Curva de Variación Horaria de la Demanda y el programa EPANET, (Hernández, 2009) y (Alcocer y Arreguín, 2010).

La otra sección de control es el tramo (tubería) 2957 con 12 pulgadas de diámetro, el área de influencia o de suministro en la zona se muestra en la Ilustración 6-2.

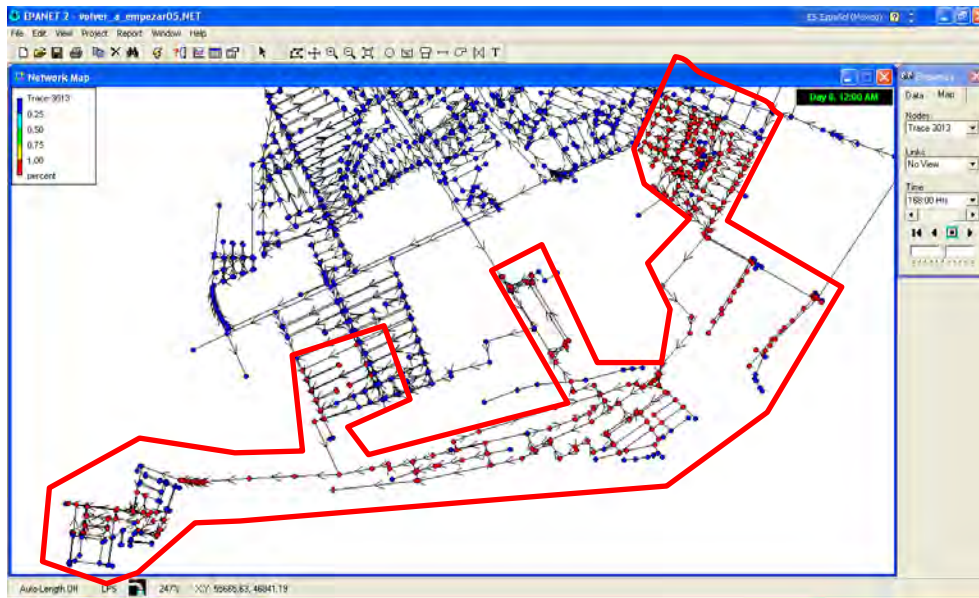
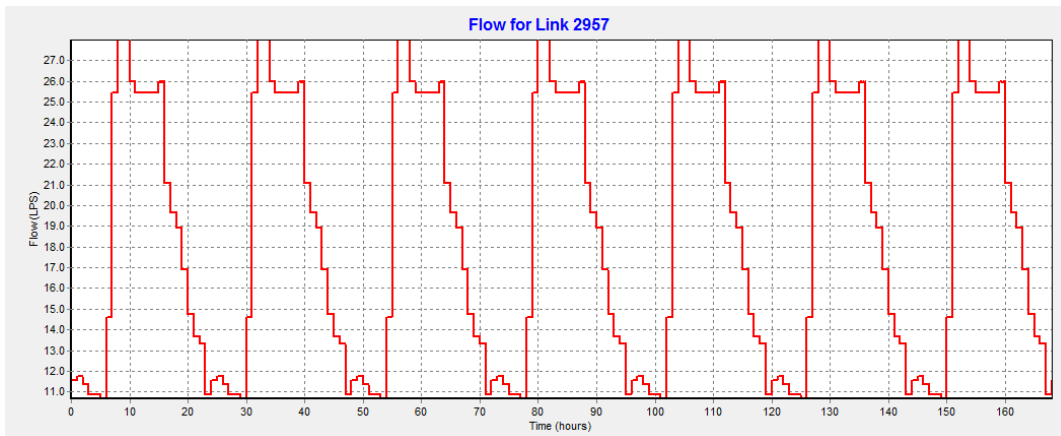


Ilustración 6-2. Área de influencia del tramo 2957(Alcocer y Arreguín, 2010).

El caudal en el tramo en cuestión (2957), se muestra en la Gráfica 6-2.



Gráfica 6-2. Caudal calculado en el Tramo 2957, con la CVHD y EPANET (Arreguín, Alcocer, 2010).

El comportamiento del caudal en la tubería 2957, también es cíclico donde el caudal máximo es 28 l/s y mínimo de 10 l/s, (Arreguín y Alcocer, 2010).

Se observa que el comportamiento de las curvas de caudal y de presión, son cíclicas y suavizadas, debido a la escala horaria que establece la Curva de Variación de la Demanda.

En el tramo analizado, se observa que el caudal tiene signos siempre positivos, ver Gráfica 6-2, el hecho de que no haya cambio de signo en el caudal significa que el flujo sigue la misma trayectoria.

6.2.2. ESQUEMA ESTOCÁSTICO EN EL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Se consideran 69 domicilios en la generación de series sintéticas de consumo; estos se dividen en tres niveles socioeconómicos: alto (6 domicilios), medio (53 domicilios) y bajo (10 domicilios).

Con base en el promedio de los consumos horarios y el día de la semana de los domicilios, se divide el consumo en ocho bloques, ver Tabla 6-1.; éstos facilitan que las series sintéticas generadas tiendan mejor a la medición (comportamiento real), es decir, la función objetivo tiende a cero, ver Ecuación 4-4.

Tabla 6-1. Bloques horarios para el análisis de consumos registrados, en función del comportamiento típico de la demanda.

Del primer domingo de Abril al último sábado de Octubre de 2003		
Número de Bloque	Día de la semana	Horario
1er Bloque	Lunes-Viernes	00:01 - 06:00
2do Bloque	Lunes-Viernes	06:01 - 20:00
3er Bloque	Lunes-Viernes	20:01 - 22:00
4to Bloque	Lunes-Viernes	22:01 - 24:00
5to Bloque	Sábado	00:01 - 07:00
6to Bloque	Sábado	07:01 - 24:00
7to Bloque	Domingo y Festivos	00:01 - 19:00
8vo Bloque	Domingo y Festivos	19:01 - 24:00

Ya que la función objetivo se resuelve mediante un método de optimización no lineal, es importante fijar el rango de búsqueda de dos parámetros empleados en el esquema de Neyman-Scott, esto permite una mejor convergencia y con mayor rapidez en el proceso de optimización.

El rango de búsqueda se ajustó para la frecuencia de los pulsos de 1 minuto hasta 24.75 minutos y el rango de la intensidad promedio de los pulsos se ajustó de 1.0 l/s hasta 6.0 l/s, en la Tabla 6-2 se presentan los rangos empleados por Hernández (2009).

Tabla 6-2. Rango de búsqueda para obtener los parámetros del modelo Neyman-Scott (Hernández, 2009).

Parámetro	Representación	Desde	Hasta
$\lambda^{-1}(\text{min}^{-1})$	Representa el tiempo promedio entre dos eventos	1	0.0404
$\beta^{-1}(\text{min}^{-1})$	Representa el tiempo promedio entre cada pulso individual y el origen del evento	1	0.05
$\eta^{-1}(\text{min}^{-1})$	Representa la duración promedio de los pulsos	10	0.007
$\mu_x^{-1}(\text{l/min})$	Es la intensidad promedio de los pulsos	1	6
$E(c)$	Es el número esperado de celdas por evento	1	20

Estos parámetros son los introducidos en la generación en el esquema de NSRPM para obtener las series sintéticas, donde $\lambda^{-1}(\text{min}^{-1})=1$ hasta 0.0404 min^{-1} , significa que la ocurrencia entre dos eventos va de 1 a 25 minutos; $\beta^{-1}(\text{min}^{-1})=1$ hasta 0.05 min^{-1} , significa que el promedio entre cada pulso individual y el origen del evento va de 1 a 20 minutos; $\eta^{-1}(\text{min}^{-1})=10$ a 0.007 min^{-1} , significa que la duración de los pulsos va de 0.1 a 143 minutos; $\mu_x^{-1}(\text{l/min})=1$ a 6 l/min , significa que la intensidad promedio de los pulsos va de 1 a 6 l/min y $E(c)=1$ a 20, significa el número de celdas esperadas por evento.

En la Tabla 6-3 se muestran los resultados de estos parámetros para tres viviendas (se omite el resto de las viviendas para evitar la extensión del manuscrito).

Tabla 6-3. Resultados de tres viviendas, a partir del esquema de optimización para obtener los parámetros del Modelo Neyman-Scott (Hernández, 2009).

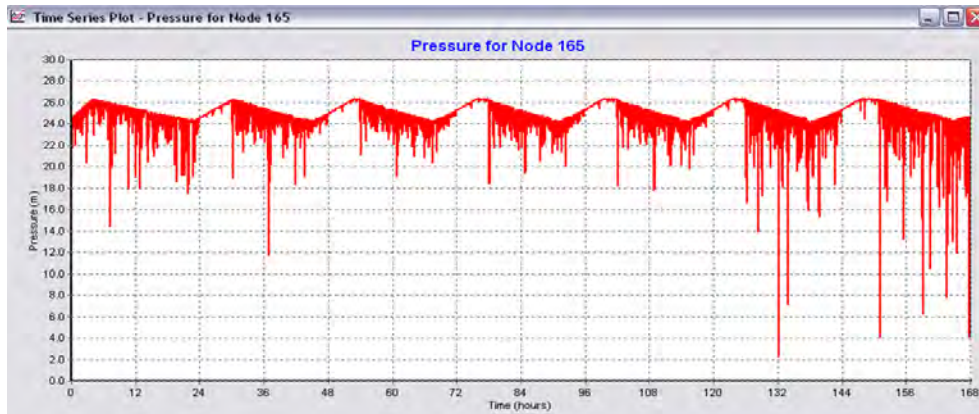
Aguirio #2989, 4 de Marzo								
	L - V 0 a 6	L-V 6 a 20	L - V 22 a 24	L - V 20 a 22	SAB 0 a 7	SAB 7 a 24	DOM 0 a 19	DOM 19 a 24
Media (l/min)	0.055054083	0.626904276	0.102736167	0.26492175	0.08645	0.241586118	0.410192	0.098933
Varianza	0.040539845	0.520272514	0.084131995	0.164427344	0.362554518	0.675197114	0.64618118	0.303552409
Covarianza	0.014139843	0.39353893	0.016939843	0.040124741	0.079786048	0.346527573	0.5345365	0.041053162
Volumen	19.81947	526.599592	12.32834	31.79061	36.309	246.41784	467.619	29.6799
λ (min ⁻¹) =	0.021073031	0.085306731	0.049625627	0.130116473	0.02405621	0.028127875	0.020911312	0.034313518
B (c) =	2.673551733	8.499083294	6.149055869	4.514665487	8.007270009	7.512966651	1	8.894283665
η (min ⁻¹) =	8.139366842	10	8.175871006	9.472017552	2.228463946	4.767337602	0.434332244	3.1545514
β (min ⁻¹) =	0.260100885	0.19272699	0.156282109	0.15556707	0.609578768	0.526210845	0.05	0.197488282
E(x) =	7.953614995	8	2.752598951	4.271714804	1.000135682	5.45003767	8	1.022592402
Z =	3.35E-20	0.072953397	5.69E-21	5.56E-21	2.38E-20	1.86E-21	0.015818391	1.26E-20
Bahía de Agiabampo 1555, Pradera Dorada								
	L - V 0 a 6	L-V 6 a 20	L - V 22 a 24	L - V 20 a 22	SAB 0 a 7	SAB 7 a 24	DOM 0 a 19	DOM 19 a 24
Media (l/min)	0.045786833	0.729771097	0.148833786	0.253514286	0.027151	0.530649882	0.108819	0.2511648
Varianza	0.04650987	0.820240049	0.121156142	0.217165409	0.136124734	3.12384331	0.683485573	1.123799436
Covarianza	0.00868198	0.62283003	0.030689862	0.085137666	0.067583782	2.068168032	0.290455989	0.533493002
Volumen	16.48326	613.0077214	17.86005429	30.42171429	11.40342	541.26288	124.05366	75.34944
λ (min ⁻¹) =	0.061844428	0.074375779	0.063390855	0.03985288	0.01667	0.018254168	0.01667	0.023966047
B (c) =	1.824990546	11.74765461	6.972211669	8.693454715	1	20	4.289301345	9.021370394
η (min ⁻¹) =	4.845444031	10	9.181919652	9.061657409	0.485594888	5.503943252	1.021639663	4.852601513
β (min ⁻¹) =	1	0.193370172	0.191610789	0.110755333	0.437048268	0.381981037	0.645930873	0.870213426
E(x) =	1.965680795	8	3.091988314	6.630678439	1	8	1.800284937	5.637213473
Z =	1.38E-20	0.041439575	7.13E-21	9.24E-23	0.201305457	3.42E-19	0.053939499	8.82E-22
Diana 3784, Canaco								
	L - V 0 a 6	L-V 6 a 20	L - V 22 a 24	L - V 20 a 22	SAB 0 a 7	SAB 7 a 24	DOM 0 a 19	DOM 19 a 24
Media (l/min)	0.049073833	0.66725901	0.4331962	0.2034596	0.161771429	0.116795235	0.240101	0.0876546
Varianza	0.109318292	1.314752977	0.486471206	0.370686799	1.267867875	0.712478704	1.330646762	0.654283504
Covarianza	0.044524596	0.941742792	0.208085181	0.200619105	0.316614688	0.340411026	0.686141994	0.187960224
Volumen	17.66658	560.497568	51.983544	24.415152	67.944	119.13114	273.71514	26.29638
λ (min ⁻¹) =	0.035868977	0.055875306	0.141209065	0.029230371	0.018627331	0.01667	0.016674485	0.01667
B (c) =	1.303999154	1.155094495	6.491704552	7.357074637	17.98918653	4.6472362	10.89006257	2.70403443
η (min ⁻¹) =	0.953087444	0.410515588	9.827389181	7.553398652	2.545372705	1.379906499	6.046201169	0.46808477
β (min ⁻¹) =	0.47752583	0.05	0.490553327	0.414916812	0.845582536	0.757264601	0.859896248	0.403943763
E(x) =	1	4.244109286	4.644099007	7.146297615	1.22882786	2.446032448	8	1
Z =	4.73E-08	1.29E-12	2.25E-21	1.59E-21	6.95E-21	0.070586263	3.98E-06	0.017994104

Para cada domicilio se generaron 50 series de consumo (ya integrando los bloques por día), con el fin de que el promedio de los momentos estadísticos tiendan a los momentos observados en la medición (promedio de ensamble). Por ende se obtuvieron 300 series de consumo para el nivel alto, 2650 para el nivel medio y 500 series para el nivel bajo, con un total de 3450 series de consumo.

Se elige por cada domicilio una de las 50 series sintéticas, en este caso la número 33. Para ello se consideró la semejanza de sus momentos, con respecto a los momentos observados de la serie medida en el domicilio; obteniendo así, 69 series sintéticas de consumo que se asignan en función al nivel socioeconómico de la casas-habitación en el modelo de simulación hidráulica, 6 en nivel socioeconómico alto, 53 en nivel medio y 10 en nivel bajo (Hernández, 2009).

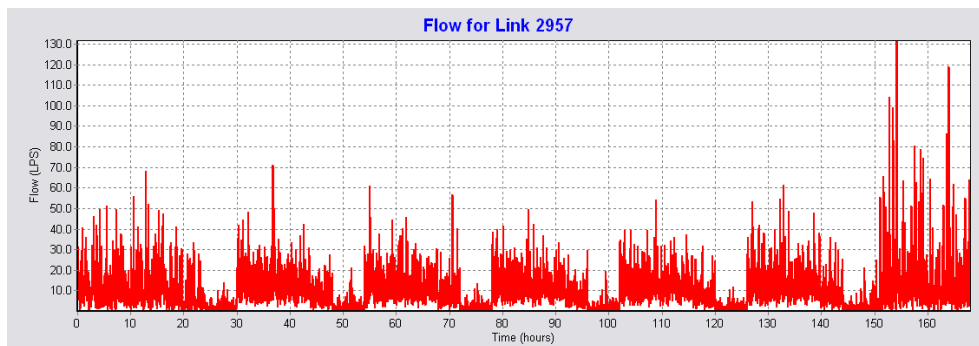
Elegida la serie estocástica generada número 33, se introduce en la sección de patrones dentro del programa EPANET y posteriormente se realiza el cálculo, los puntos de control son el nodo 165 y el tramo 2957, ver ubicación en la Ilustración 5-3, los resultados obtenidos se comparan con los obtenidos con la CVHD.

La presión calculada en el nodo 165 con el programa EPANET, presenta fluctuación diaria, debido a la variación estocástica de las series sintéticas empleadas como patrón de la demanda, la presión máxima es de 26.34 mca y la mínima de 2.69 mca, ver Gráfica 6-3, (Alcocer y Arreguín, 2010).



Gráfica 6-3. Presión en el Nodo 165 para el escenario estocástico (Alcocer y Arreguín, 2010).

Continuando el análisis, se revisa el comportamiento del flujo en el mismo tramo examinado con el esquema determinístico (tramo 2957). La Gráfica 6-4. muestra el flujo en el tramo, cuando se aplica el esquema estocástico; los caudales presentan solo sentido de flujo en la tubería, con caudales entre 130.00 l/s y cercanos a cero litros por segundo.



Gráfica 6-4. Caudal calculado en el Tramo 2957, en el escenario estocástico (Alcocer y Arreguín, 2010).

El comportamiento del caudal y la presión es muy variable bajo este esquema. Los cambios repentinos, son ocasionados por la aleatoriedad aplicada en la formación de los patrones de consumo, lo que provoca en ciertos instantes (minutos) consumos altos, y un instante posterior se presentan consumos bajos, hasta el punto de llegar a ser nula. Cabe aclarar que en el sistema analizado todas estas variaciones son absorbidas por el tanque de regulación y los equipos de bombeo.

Los caudales presentados en las tuberías bajo este esquema, pueden ser positivos o negativos a través del tiempo, lo que indica cambios de dirección del flujo; la ausencia de flujo por su parte, representa tiempos de estancamiento o tiempos de residencia elevados del agua dentro de las tuberías.

Es importante recordar que los patrones estocásticos se pueden variar utilizando un bloque cualquiera de las series sintéticas generadas, en este caso se utilizó aleatoriamente el bloque 33.

6.2.3. COMPARACIÓN ENTRE ESQUEMAS

Cuando se emplea la CVHD como demanda base, se observa que la presión tiene un comportamiento cíclico y suavizado (sin cambios abruptos), donde la presión máxima es de 26 mca y la presión mínima de 21 mca, ver Gráfica 6-1.

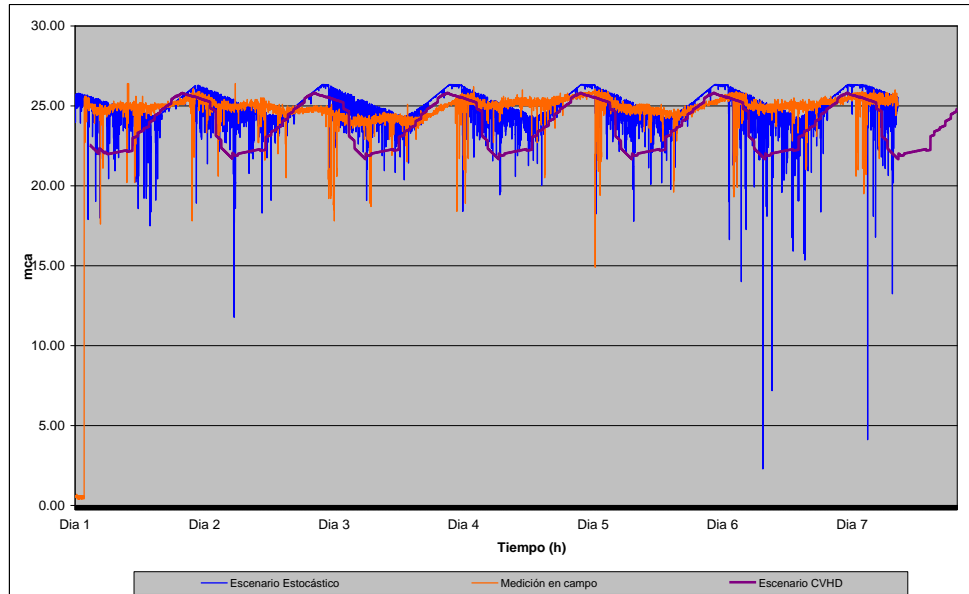
Cuando se aplica el esquema estocástico, se observa una fluctuación diaria, debido al empleo de las series sintéticas estocásticas empleadas como patrón de la demanda, donde la presión máxima es de 26.34 mca y la presión mínima de 2.69 mca, ver Gráfica 6-3.

La Tabla 6-4 compara la presión medida contra los escenarios simulados en el nodo 165.

Tabla 6-4. Comparación de presiones mínimas y máximas en el nodo 165.

ESCENARIO	NODO	PRESIÓN MÁXIMA (mca)	PRESIÓN MÍNIMA (mca)
MEDICIONES	165	26.30	15.0
CVHD	165	26.00	21.0
ESTOCÁSTICO	165	26.34	2.69

La Gráfica 6-5. compara las presiones medidas y las obtenidas con ambos esquemas en el nodo 165, se observa, que el esquema estocástico representa mejor el comportamiento del consumo por pulsos. Si se obtienen curvas promedio en ambos casos (medido y estocástico), la coincidencia es mayor en relación a la CVDH.



Gráfica 6-5. Comparación de las presiones registradas en el nodo 165 con los esquemas utilizados, (Arreguín y Alcocer, 2010).

Con el método determinístico al igual que con las presiones se obtiene un comportamiento cíclico y suavizados, con caudales máximos de 28 l/s y mínimos de 10 l/s aproximadamente y el flujo en la misma dirección (tubería 2957).

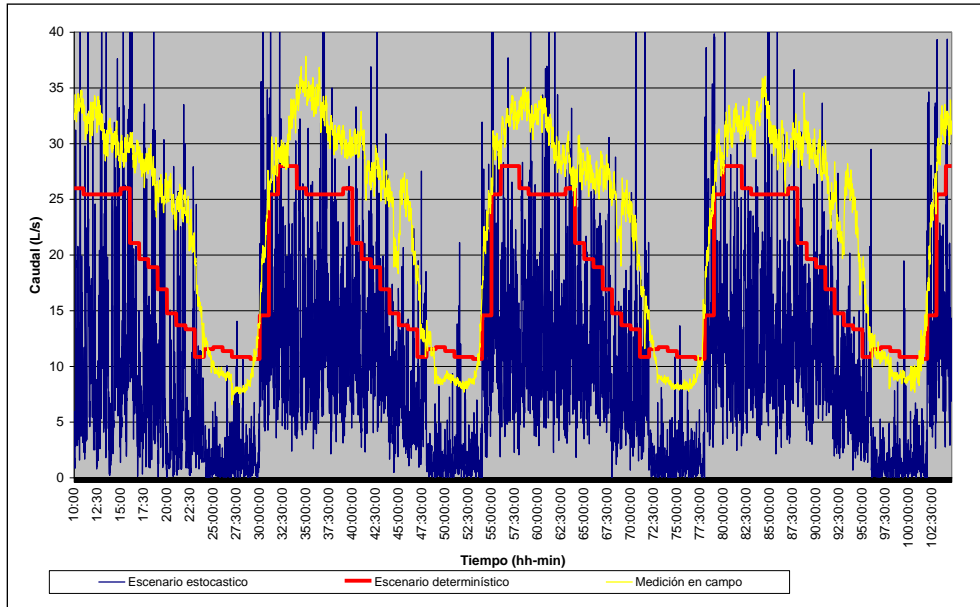
Con el esquema estocástico se obtuvieron caudales en un solo sentido de la tubería con valores entre 130.00 l/s y cercano a cero litros por segundo.

La Tabla 6-5 compara el caudal medido con los escenarios simulados en el tramo 2957.

Tabla 6-5. Comparación de los caudales máximos en el tramo 2957

Escenario	Tramo	Colonia	Diámetro (in)	Q max (l/s)	Q medio (l/s)	Observaciones
Medido	2957	Infonavit Humaya	12	38	23.16	Es mayor, ya que considera las fugas
CVHD				28	18.48	Sin cambio en sentido del flujo
Estocástico				130	17.35	Sin cambio en sentido del flujo

En la Gráfica 6-6, se muestra la comparación entre los caudales medidos y los obtenidos con ambos esquemas en el tramo 2957.



Gráfica 6-6. Comparación del caudal medido con los resultados obtenidos aplicando la CVHD y el esquema estocástico en el tramo 2957 (Arreguín, Alcocer, 2010).

Los cambios repentinos en el caudal son ocasionados por las series sintéticas estocásticas que se emplean como patrones de la demanda en los nodos. Todas estas variaciones las absorben el tanque de regulación y los equipos de bombeo. También se observa que el caudal obtenido con la CVHD, subestima el caudal demandado (medido). Por otro lado, el comportamiento de la serie del caudal con la CVHD no representa la medición, mientras que la serie sintética tiene un comportamiento más apegado a la medición.

6.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EN TRABAJOS PREVIOS

El comportamiento de la serie del caudal con el escenario estocástico, tiene un comportamiento más apegado a la medición (comportamiento real de la red).

Los caudales que se presentan en los nodos bajo este esquema, pueden ser positivos o negativos a través del tiempo (cambios de dirección del flujo), la ausencia de flujo representa tiempo de

estancamiento o tiempo de residencia elevada del agua dentro de las tuberías, situación que con la CVHD no se puede alcanzar.

Los patrones estocásticos se pueden variar utilizando un bloque cualquiera de la series sintéticas generadas (son equiprobables), lo que da una mayor flexibilidad en el empleo de los patrones de consumo con los que se alimenta el modelo.

El empleo del esquema estocástico de Neyman-Scott, permite obtener resultados con mayor apego al funcionamiento de una red de agua potable.

La aplicación de la CVHD tiende a sobredimensionar, y en algunas ocasiones a subdimensionar, la infraestructura hidráulica, debido a los resultados obtenidos en las simulaciones utilizadas en el diseño, ver el caudal en la Gráfica 6-6. Se recomienda que el proyectista considere esta observación y que obtenga la CVHD por mediciones en el sitio analizado

Por otro lado se recomienda emplear diferentes series estocásticas en la red (no sólo una por domicilio), en este caso emplear las 50 series generadas por cada domicilio, la aplicación de estas series será de forma aleatoria. De igual forma se recomienda emplear series estocásticas que tengan la duración del tiempo de simulación (no de 24 horas), en este caso de 168 horas. Esto con el fin de obtener un modelo con patrones de la demanda diferentes y estocásticos, tal y como ocurre en la realidad.

Es evidente que al emplear este tipo de enfoques estocásticos, se requiere de un esfuerzo computacional elevado, por lo que es necesario simplificar algunos procesos del mismo, dependiendo obviamente del tipo de aplicación en la modelación que se vaya a realizar (planeación, diseño, análisis, calidad del agua, etc.). Un ejemplo de ello para afrontar y apoyar la simplificación de procesos, es la agregación espacial y temporal de registros de variables (AET).

La AET inicialmente como ventaja presenta una disminución en la cantidad de información por emplear. Además a través de la AET, es posible definir criterios en la modelación de redes de distribución, así como:

- a) Criterios en la modelación de redes de distribución de agua potable, empleando series estocásticas de consumo obtenidas con el esquema de Neyman-Scott.
- b) Criterios en la modelación de redes de distribución de agua potable esqueletizadas, empleando las series estocásticas de consumo obtenidas con el esquema de Neyman-Scott, de tal forma que los resultados obtenidos en la red simplificada sean más apegados al funcionamiento hidráulico de la red de distribución.

Automatizar los bloques generados estableciendo un esquema de Monte-Carlo en el proceso de simulación.

7. AGREGACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL CONSUMO DOMÉSTICO (AET)

7. AGREGACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL CONSUMO DOMÉSTICO (AET)

La agregación temporal y espacial permite obtener valores discretos del consumo domiciliario con intervalos de tiempo mayores a un minuto, así como también el comportamiento de la red de distribución de agua potable en las redes principales y secundarias, sin considerar la toma domiciliaria de forma individual.

En el presente capítulo se presenta el método empleado para agregar temporalmente la serie de datos que se suministran en el modelo hidráulico, así como también el método de agregación espacial (esqueletización o simplificación) de la red de distribución.

7.1. METODOLOGÍA DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Con base en lo anterior, la metodología empleada para la agregación espacial y temporal en el presente trabajo, se simplifica en el Paso 2 de la Ilustración 7-1.

La descripción resumida de los incisos del Paso 2 es la siguiente

p) La agregación temporal consiste en tomar las series sintéticas de la base datos (pulsos con duración de un minuto), Alcocer, 2007, 2010 y Hernández, 2009, y promediar los datos a cada 30 minutos ensamblando así series sintéticas con pulsos de 30 minutos de duración.

q) Se introducen las nuevas series sintéticas en el modelo de simulación hidráulica y se extraen los resultados para realizar el análisis de estos.

r) Se simplifica la red tomando en cuenta las reglas mencionadas más adelante en este capítulo (7.3.1), con base en los diámetros de la red y los puntos de evaluación se realiza la agregación espacial en 3 niveles; en el nivel 1 se simplifica la red eliminando las tuberías con diámetro igual o menor a 76.2 mm, el nivel 2 elimina las tuberías con diámetros igual o menor a 152.4 mm y el nivel 3 elimina la tuberías con diámetros igual o menores a 254 mm. Además se consideran dos criterios para la agregación de los consumos domiciliarios, el primero toma en cuenta el punto de equilibrio y el segundo considera los nodos próximos al nodo de agregación.

s) Se realiza la simulación hidráulica con la red simplificada y se extraen los resultados para realizar el análisis de estos.

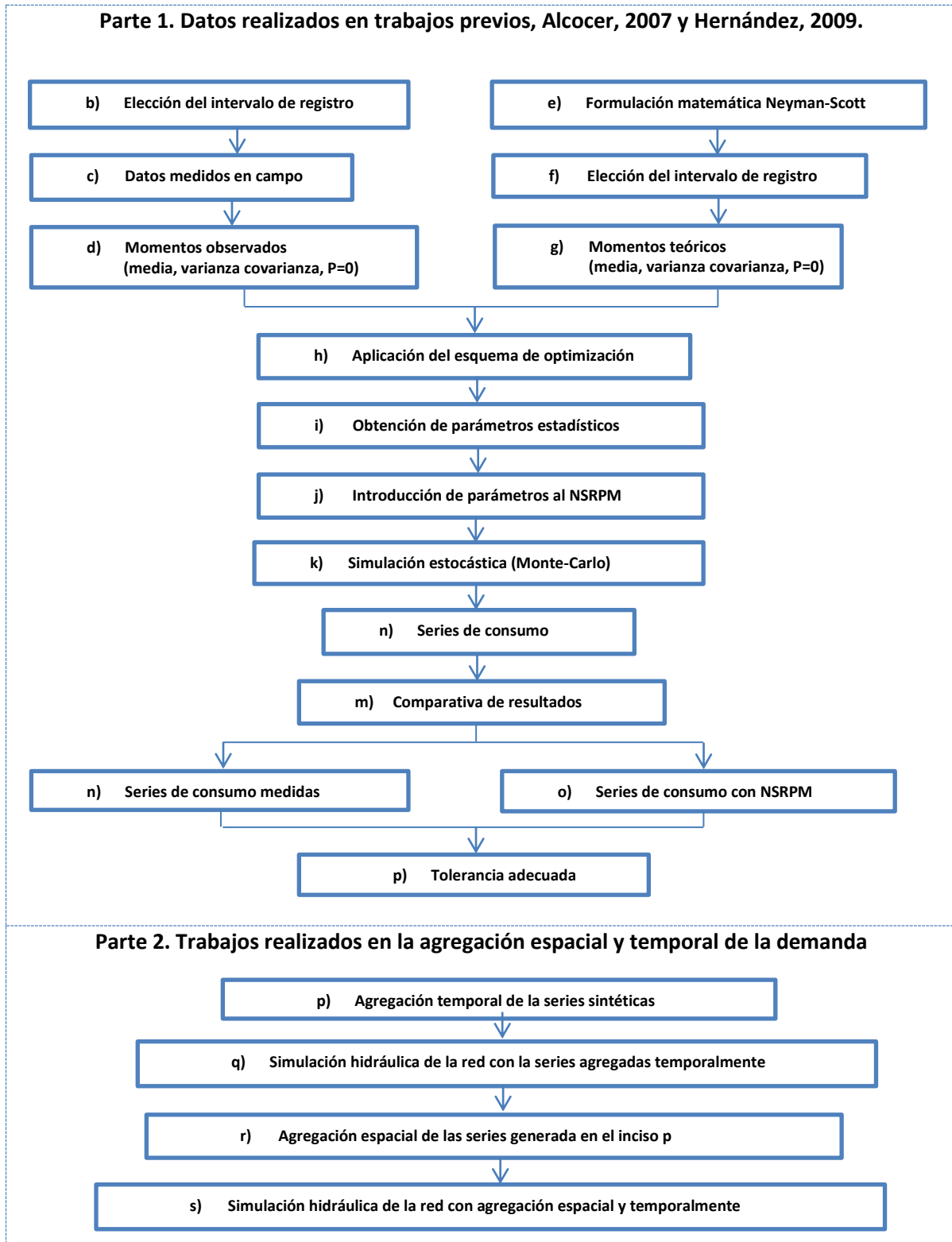


Ilustración 7-1. Metodología empleada en la agregación espacial y temporal.

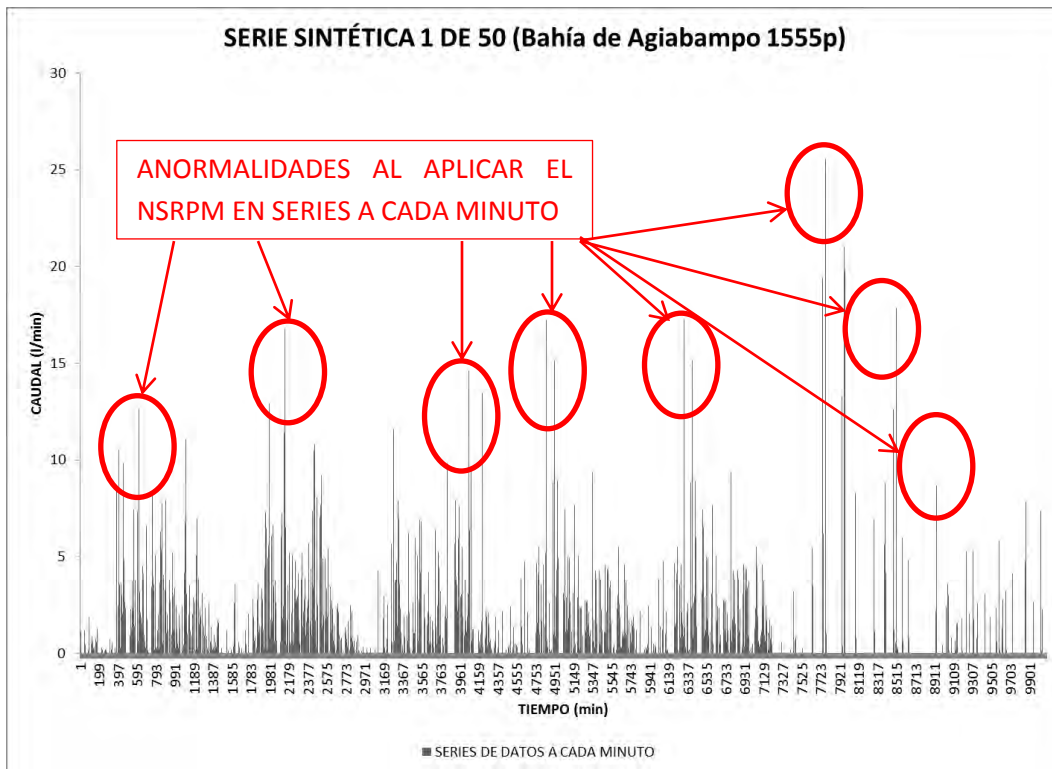
Las consideraciones matemáticas tomadas y empleadas en cada paso se describen en los puntos siguientes.

7.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA EMPLEADA EN LA AGREGACIÓN TEMPORAL

La agregación temporal genera una serie de consumo que facilita el análisis de la información y reduce sustancialmente la cantidad de datos generada, haciendo práctica la introducción de los patrones de la demanda en la red de abastecimiento. Por otro lado suaviza los picos de las series obtenidas bajo el esquema NSRPM (series con datos a cada minuto), ver Gráfica 7-1., ya que realiza un promedio de los datos ocurridos en un intervalo de tiempo seleccionado.

En la agregación temporal es importante conocer el tiempo óptimo y práctico para realizar la agregación, dado que manejar un lapso pequeño no aportaría mucha ayuda en el manejo de la información y por el contrario manejar intervalos muy grandes, afectaría el comportamiento hidráulico real de la red.

En la presente tesis, la base de datos original proporciona información a cada minuto, por ende la agregación tiene que ser mayor a un minuto. Para determinar el tiempo adecuado de agregación temporal se emplean los resultados obtenidos del análisis espectral del consumo doméstico de agua potable realizados por Alcocer (2007) y Moreno (2009).



Gráfica 7-1. Picos de los caudales ocurridos en un minuto en series sintéticas con el esquema NSRPM.

La Gráfica 7-1. muestra picos anormales (intensidades máximas de caudal) en una de las series sintéticas generadas, estos picos se presentan de forma importante en la información correspondiente a los fines de semana (7200-10080 minutos). Sin embargo, éstos son matemáticamente correctos, por lo que eliminarlos representaría un desajuste en la masa. La agregación temporal es una solución práctica de estas anomalías.

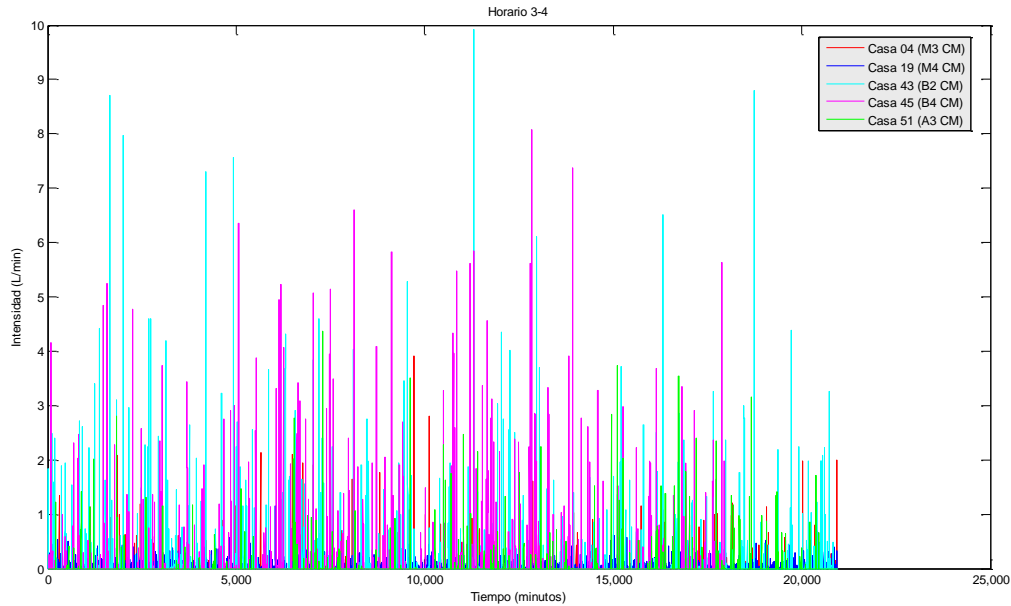
7.2.1. INTERVALO DE TIEMPO ADECUADO PARA LA AGREGACIÓN TEMPORAL

El intervalo de tiempo adecuado en la agregación temporal, es aquel que permita agregar y desagregar la series de datos sin perder información en ese proceso, por ejemplo, si se agrega temporalmente la serie de original de 1 minuto a grupos de 30 minutos, estos grupos de 30 minutos, deben tener la característica de desagregarse a intervalos de tiempo de 1 minuto sin pérdida de información. Esto con el fin de que el patrón de consumo se apegue al comportamiento real en la red de distribución.

Para obtener el intervalo de tiempo adecuado en la agregación temporal se tomó en cuenta el trabajo sobre el análisis espectral de las series generadas por el esquema de NSRPM realizada por Moreno (2009), los datos analizados son los mismos que se emplean en la presente tesis. Este método emplea el mismo criterio que utilizaron Bo *et al* (1994) y Alcocer (2007).

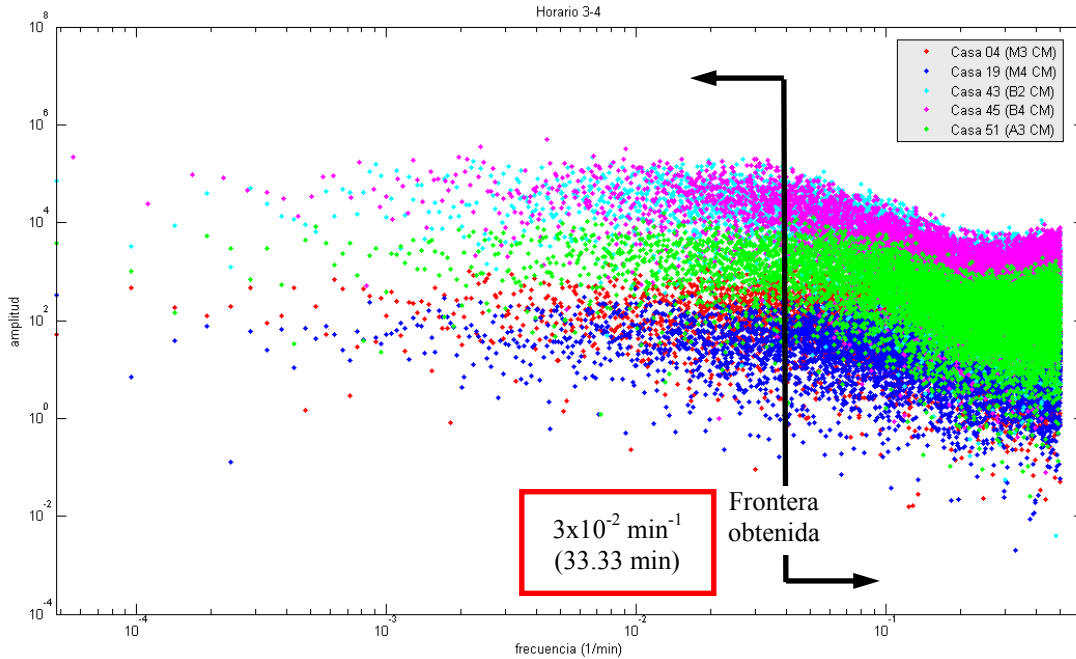
7.2.1.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS SERIES GENERADAS BAJO EL ESQUEMA DE NSRPM

Para el análisis espectral se parte de la serie de datos generada, como la que se presenta en la Gráfica 7-2. y se le aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y se multiplica por su conjugado, se obtiene el espectro discreto de la señal analizada; posteriormente el espectro discreto se escala para semejarse con el espectro continuo.

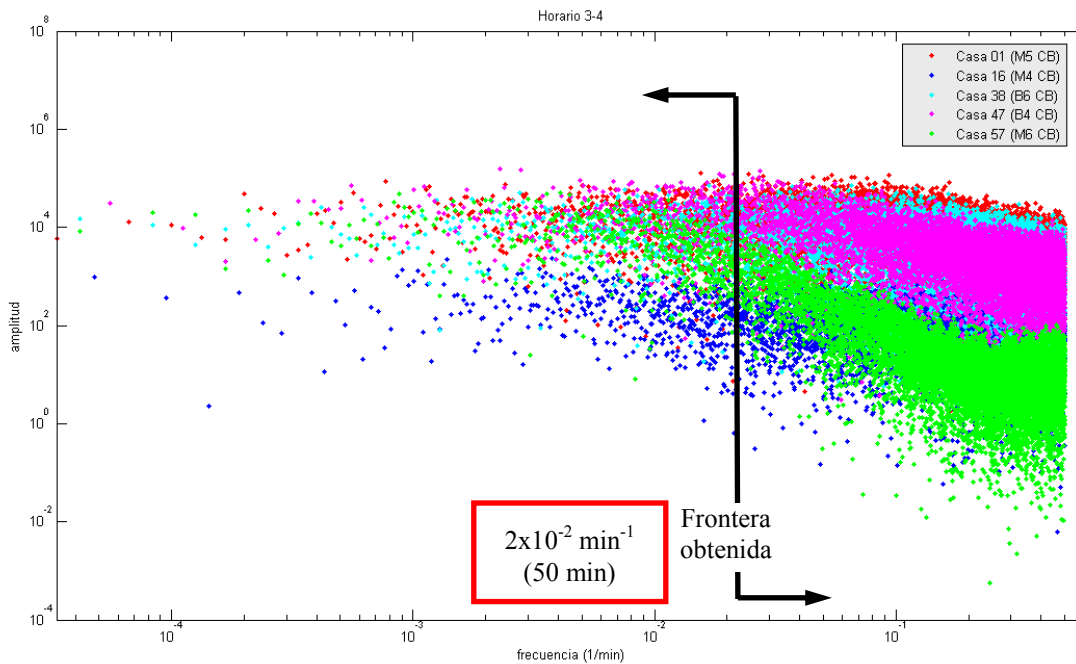


Gráfica 7.2. Señales de la series sintéticas generadas en el espacio físico para las casas 04, 19, 43, 45, y 51 con consumo medio (3-4), Moreno, 2009.

En la Gráfica 7-3. se ve el espectro de las series sintéticas generadas de las casas contempladas en la Gráfica 7-2. El cambio abrupto de pendiente se presenta en la frecuencia cercana a $3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (33.33 minutos) y en la Gráfica 7-4. a $2 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (50 minutos). En caso de medir en campo el consumo doméstico con un intervalo de registro mayor al obtenido con el análisis espectral o bien intentar la desagregación temporal en registros menores a un minuto, se empezará a perder información dando origen al fenómeno de enmascaramiento o *aliasing* (Moreno, 2009).

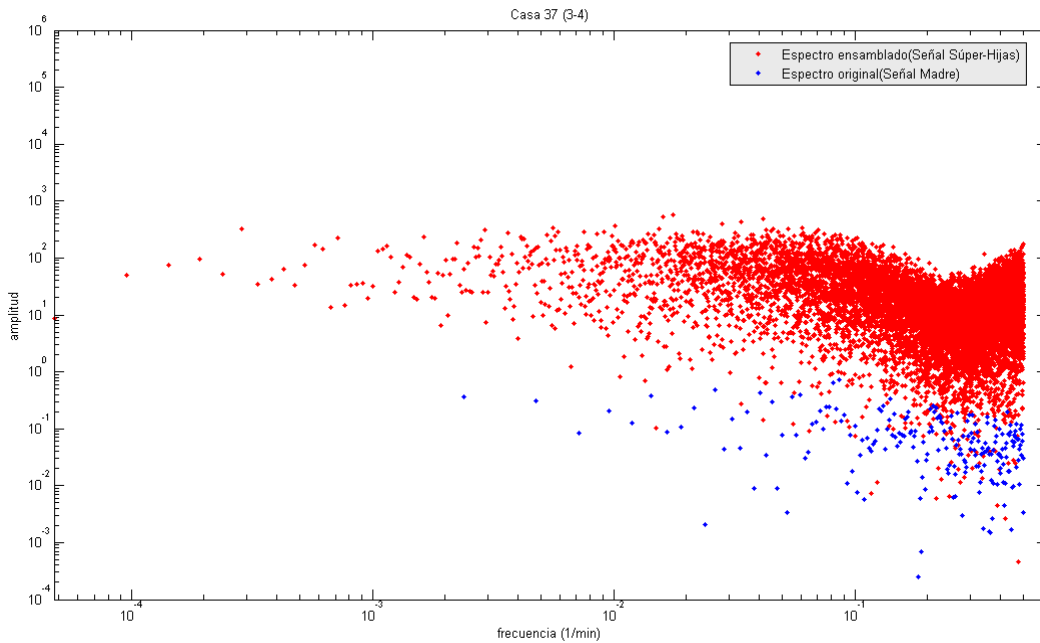


Gráfica 7-3. Espectros de las series sintéticas generadas para las casas 04, 19, 43, 45, y 51 con consumo medio (3-4), Moreno, 2009.



Gráfica 7-4. Espectros de las series sintéticas generadas para las casas 01, 16, 38, 47, y 57 con consumo bajo (3-4), Moreno, 2009.

En la Gráfica 7-5. se observa el fenómeno del enmascaramiento o *aliasing*, en la casa habitación con domicilio Presagio 3351 Horizontes, en el horario 3-4. Este fenómeno se presenta en el espectro ensamblado cuando la pendiente empieza a ser positiva.



Gráfica 7-5. Representación del fenómeno de enmascaramiento o *aliasing*, Moreno, 2009.

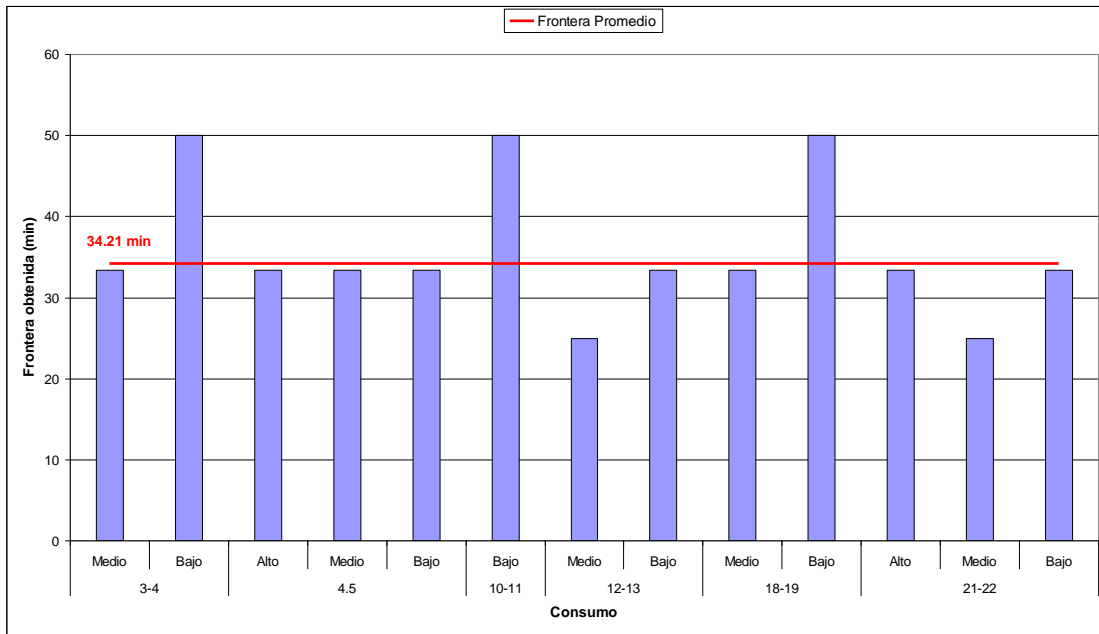
La Tabla 7-1. presenta el resumen de la frontera obtenida de los espectros de cada horario dividido por consumo. La frontera que predomina se presenta en la frecuencia a $3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (33.33) minutos y la frontera promedio que se obtuvo está a los 34.21 minutos, ver Gráfica 7.6. Esto indica que el rango de agregación temporal empleando técnicas de Fourier es entre los 34.21 y un minuto. Por lo tanto, es posible medir en campo con intervalo de registro hasta de 34.31 minutos y recuperar información con intervalo de registro de un minuto (Moreno, 2009).

Tabla 7-1. Resumen de la frontera obtenida de los espectros para cada horario dividido por consumo, Moreno, 2009.

Horario	Consumo	Frontera obtenida		Promedio
3-4	Medio	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	$2.92 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (34.21 minutos)
	Bajo	$2 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	50 min	
4-5	Alto	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
	Medio	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
	Bajo	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
10-11	Bajo	$2 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	50 min	
12-13	Medio	$4 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	25 min	
	Bajo	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
18-19	Medio	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
	Bajo	$2 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	50 min	
21-22	Alto	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	
	Medio	$4 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	25 min	
	Bajo	$3 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$	33.33 min	

Para un consumo alto, se tiene que los horarios 4-5 y 21-22 presentan el mismo valor de la frontera (33.33 minutos). Esto no sucede para los consumos medio bajo, debido a que los valores de la frontera se distribuyen entre los 50 y 25 minutos.

De la Gráfica 7-6 se concluye que la frontera que define los procesos de agregación y desagregación temporal, la cual permite conocer el intervalo óptimo de registro de medición en campo del consumo doméstico de agua potable, se encuentra entre los 50 y 25 minutos y presenta el valor promedio de la frontera 34.21 minutos (Moreno, 2009).

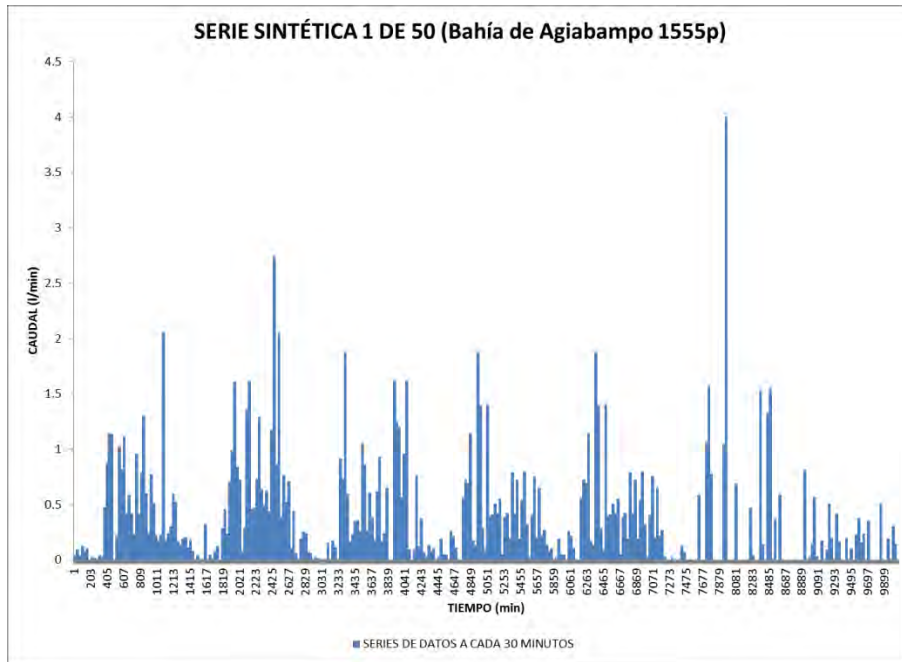


Gráfica 7-6. Frontera que define los procesos de agregación y desagregación temporal obtenida a partir de espectros (Moreno ,2009).

En la presente tesis por cuestiones prácticas se toma el intervalo de 30 minutos, ya que está dentro de rango de tiempo aceptado y permite dividir el tiempo de simulación en lapsos homogéneos.

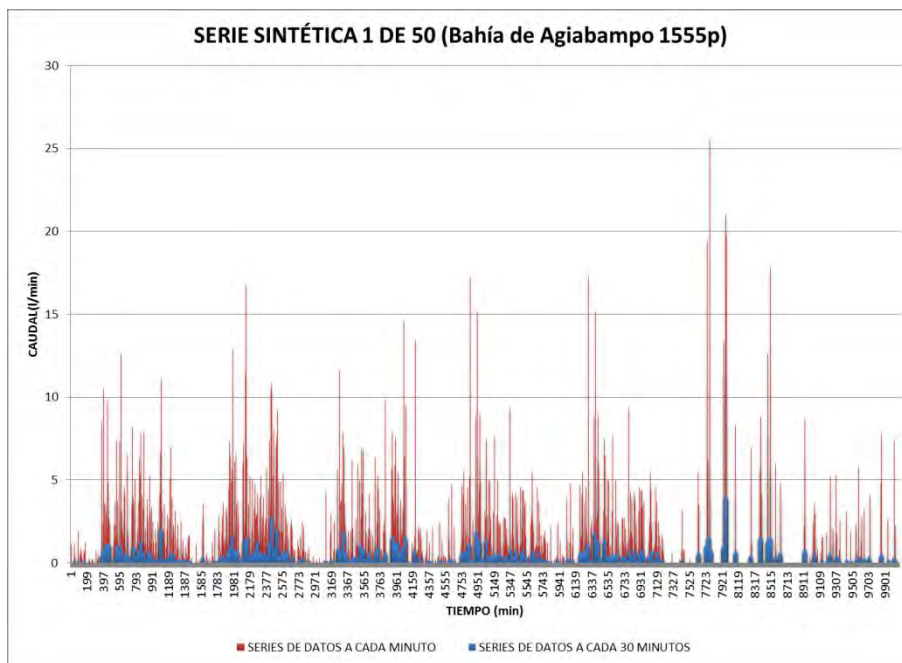
Con el lapso de agregación de 30 minutos, se realiza la agregación temporal. Para ello se divide la serie que consta de 10080 datos (10080 minutos) en 336 grupos de 30 datos (30 minutos) y se realiza el promedio de cada grupo. El promedio del caudal obtenido de cada grupo es el valor representativo. Esta agregación temporal disminuye los picos con intensidad grande y corta duración (situación que en ocasiones no representa el comportamiento en la red de distribución).

La Gráfica 7-7. muestra la serie utilizada en la Gráfica 7-1. de forma agregada a cada 30 minutos.



Gráfica 7-7. Picos de los flujos ocurridos en lapsos de 30 minutos.

En la Gráfica 7-8. se compara la serie con pulsos de un minuto y las series con pulsos de 30 minutos.



Gráfica 7-8. Comparación de la serie original y la serie agregada.

En la gráfica anterior se observa que los picos ocurridos con pulsos de un minuto (estos van de 10 a 25 l/min), disminuyen considerablemente (el máximo es aproximadamente de 4.5 l/min). Dado que en la presente tesis, se emplean los mismos datos utilizados por Moreno en el 2009, se considera que el tiempo de agregación temporal de 30 minutos es adecuado y práctico para agregar las series de consumo doméstico obtenidas bajo el esquema NSRPM con pulsos de un minuto de duración.

7.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA A EMPLEAR EN LA AGREGACIÓN ESPACIAL

En este paso se considera el método de esqueletización de la red y la agregación de los consumos de las viviendas consideradas en la simplificación de la red.

7.3.1. MÉTODO DE ESQUELETIZACIÓN DE LA RED.

La agregación espacial de una red (esqueletización), se puede resumir como una simplificación de la red de tuberías, y una caracterización de los restantes elementos de la red, de forma tal que el programa de simulación los pueda entender. Al final el modelo estará formado por un conjunto de líneas o nodos, (García-Serra et al, 2002).

Las reglas de esqueletización consideradas son las siguientes, García-Serra *et al*, 2002:

1. La simplificación de la red de distribución realiza eliminando aquellas más pequeñas, y sustituyendo las ramificaciones de la red por nodos de consumo, ver Ilustración 7-2.
2. El diámetro de tubería a simplificar depende del grado de esqueletización que se maneja (en nuestro caso tres niveles de esqueletización).
3. Dentro de una misma red puede haber zonas de consumo donde las tuberías de pequeño diámetro tengan una capacidad de transporte importante. Éstas no se deben eliminar siempre.
4. Hay casos en los que, para mantener la conectividad de algunas de mayor diámetro, es preciso incluir alguna tubería más pequeña. Hay que tener en cuenta que una tubería, que en condiciones normales de operación de red no tiene capacidad importante de transporte, puede llegar a tenerla si, por rotura o fallo, fuera necesario cerrar alguna

tubería importante. Es importante incluir éstas, ya que en muchos casos el modelo se utiliza para observar el comportamiento de la red ante estas situaciones.

5. En cualquier caso, siempre es mejor añadir una tubería de más que no eliminar una que luego pueda tener importancia en el modelo.
6. Eliminación de ramificaciones y acometidas. Se acumula la demanda conocida, que se satisface desde la ramificación, en un nodo de consumo que sustituye al que serviría de conexión de la ramificación con la red principal, ver Ilustración 7-2.
7. Se unifican los nodos próximos en los que, debido a la corta longitud de las líneas que los unen, se observará un mismo valor de presión, ver Ilustración 7-2.
8. Asociación de tuberías en serie o en paralelo, representado en este caso una única línea a un conjunto de tuberías.
9. En redes malladas se considera el punto de equilibrio hidráulico, para determinar los puntos de separación de los nodos y de esta crear ramificaciones, cuya demanda se acumula en un nodo de consumo.

Para esquematizar las reglas consideradas en la simplificación de la red se presentan las siguientes ilustraciones (7-2.-7-5.). Se debe tener en cuenta que para la aplicación de la regla 9, hay que suponer la dirección del caudal en la red. En el caso de la presente tesis se tiene el modelo no simplificado, por lo tanto, se utilizan los resultados de la simulación para obtener la dirección de caudal en la red. En los puntos donde el flujo cambia de dirección a través del tiempo se considera la dirección de flujo predominante.

En la Ilustración 7-2 se consideran las reglas 1, 6 y 7. Se agregan los consumos de la ramificación superior de tuberías de 76.2mm de diámetro al nodo 25. De igual forma el consumo de la tubería de 76.2 mm en el extremo izquierdo se agrega al nodo 162 y los consumos de las tuberías inferiores al nodo 165.

En el círculo de la Ilustración 7-4 se presenta la aplicación de la regla 8 en la simplificación de la red.

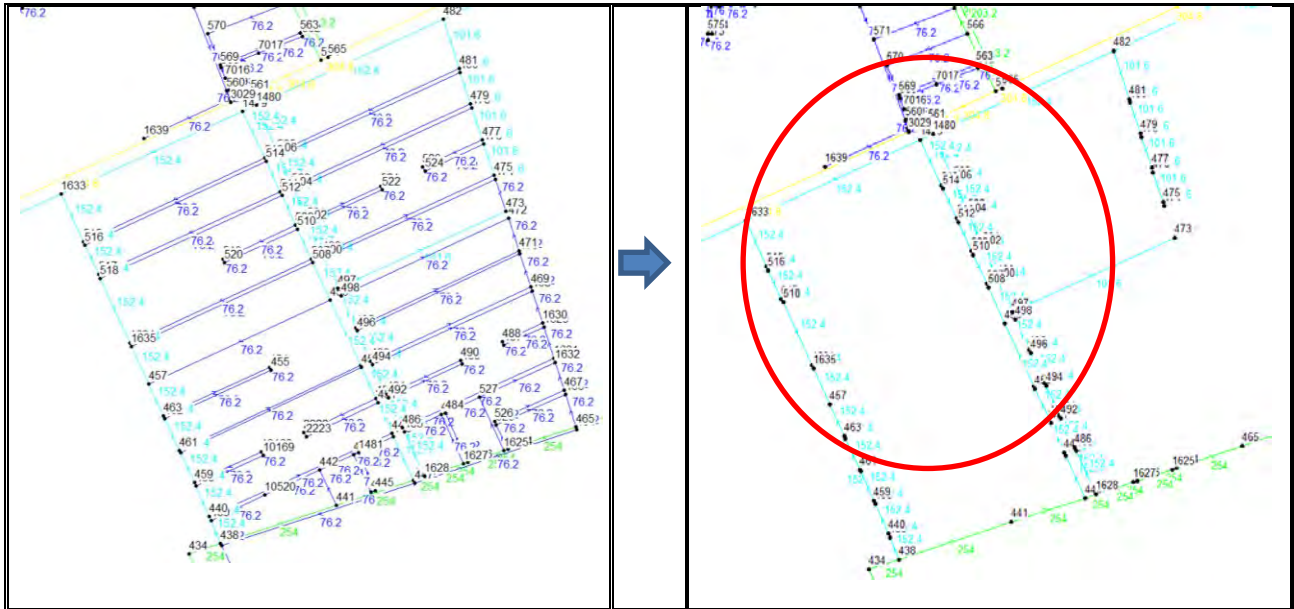


Ilustración 7-4. Agregación espacial considerando la regla 8.

La Ilustración 7-5. muestra el empleo de la regla 9 y se describe a continuación cada inciso:

- Se presenta la red sin simplificar y la red de tuberías de 76.2 mm, además se indican los tramos por eliminar, la eliminación de éstos va de acuerdo al criterio del punto de equilibrio, estos tramos son los que unen los nodos 185 -181 y 10863-183.
- Se aplica el concepto de punto de equilibrio y se presenta la red con los tramos ya eliminados y la redistribución de los caudales.
- Se muestra la red ya simplificada y se indican los nodos a los cuales se agregan los patrones de consumo después de la redistribución de los caudales, los nodos 186 y 1433

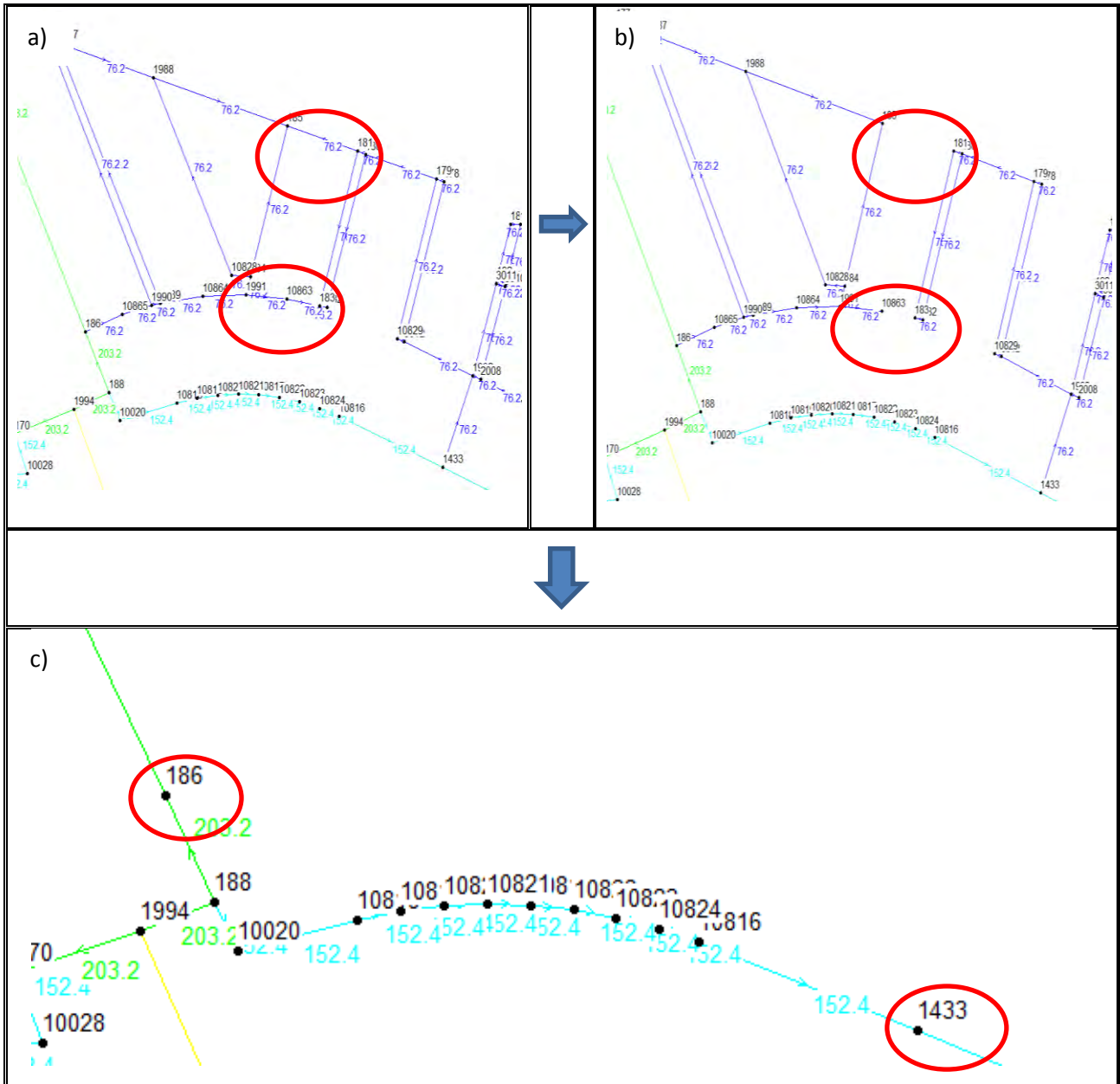


Ilustración 7-5. Agregación espacial considerando la regla 9.

Este método de simplificación de la red se aplicará al sitio y sectores de estudio, dado que la eliminación de las tuberías para la simplificación tiene como objetivo conservar el comportamiento hidráulico antes de simplificar la red, y la agregación de los consumo respeta el camino más probable del flujo, y por ende el orden de magnitud de los caudales que transportan los tramos de tubería (característica del punto de equilibrio hidráulico).

7.3.2. INFLUENCIA DE LA ELÁSTICIDAD DEL AGUA EN LA RED DE ABASTECIMIENTO

Se considera la influencia del efecto transitorio en la red, es decir, el tiempo de retraso que hay entre el momento en que empieza el consumo en la toma domiciliaria y el momento en que este ocurre en el nodo donde se realiza la agregación de las demandas (nodo de agregación). Esto se debe a la elasticidad del agua y está directamente ligado a la longitud de la tubería entre la toma domiciliar y el nodo de agregación. (Tzatchkov, Alcocer, 2010), ver Ilustración 7-6.

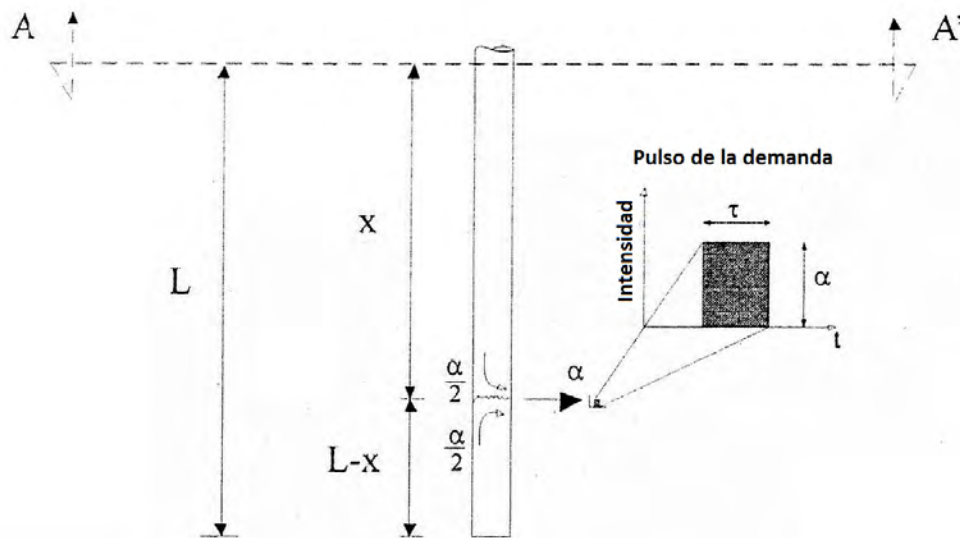


Ilustración 7-6. Pulso de la demanda en una tubería simple, Tzatchkov, Alcocer, 2006.

1. El pulso de la demanda genera dos ondas de presión, iniciando en el origen del pulso. Una de ellas se dirige a la tubería cerrada y la otra al inicio de la tubería. Cada una de esas ondas lleva un cambio de caudal igual a $\frac{\alpha}{2}$, donde α es la intensidad del pulso.
2. La onda de presión dirigida de la línea de servicio al inicio de la tubería llegará en el tiempo $\frac{x}{\alpha}$, por ejemplo, en el tiempo $\frac{x}{\alpha}$ la mitad del pulso de la demanda llegará al inicio de la tubería.
3. La otra mitad del pulso viajará a la tubería cerrada durante un tiempo $\frac{L-x}{\alpha}$. De ahí se reflejará la onda completamente hasta la tubería de inicio en el tiempo $\frac{L}{\alpha}$, de tal manera el segundo pulso de la demanda llegará completamente en el tiempo $\frac{2L-x}{\alpha}$.

4. Dependiendo de los valores de L , x , α y τ , la demanda requerida en el inicio de la tubería se desfasará, por ejemplo, cuando el pulso de la demanda se origina en el final de la tubería los efectos de este pulso se reflejan por completo en el tiempo $\frac{L}{\alpha}$.
5. El caso más crítico de desfasamiento ocurre cuando $x \rightarrow 0$, entonces el tiempo en que la tubería inicial perciba todo el pulso de la demanda es aproximadamente $\frac{2L}{\alpha}$.

Tomando en cuenta estas variables, se estudia el Sector Norte (donde se ubica el nodo 165) que corresponde al sitio más propenso a sufrir los efectos de la elasticidad del agua, dado que presenta la mayor longitud entre el nodo por agregar y el nodo de agregación. La mayor longitud de la tubería entre el nodo de agregación y el nodo más lejano es de 1200 metros aproximadamente, ver Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Longitud de la tubería entre el nodo 165 y el nodo más lejano de agregación.

LONGITUD EN LA RED – TIEMPO DE RETRASO DEL CONSUMO				
ID	NODO INICIAL	NODO FINAL	LONGITUD (m)	TIEMPO DE RETARDO (s)
1	165	118	85.21	0.1704
2	165	116	168.73	0.3374
3	165	115	178.32	0.3566
4	165	10862	215.88	0.4317
5	165	114	258.98	0.5179
6	165	113	268.89	0.5377
7	165	10861	301.11	0.6022
8	165	10860	328.49	0.6569
9	165	112	358.32	0.7166
10	165	111	375.55	0.7511
11	165	105	385.03	0.7700
12	165	106	396.87	0.7937
13	165	104	554.45	1.1089
14	165	103	542.01	1.0840
15	165	99	456.09	0.9121
16	165	100	466.29	0.9325
17	165	97	346.02	0.6920
18	165	98	358.65	0.7173
19	165	96	236.49	0.4729
20	165	164	12.60	0.0252
21	165	117	98.75	0.1975
22	165	10814	114.45	0.2289
23	165	95	245.88	0.4917
24	165	119	176.84	0.3536
25	165	94	299.85	0.5997
26	165	93	310.37	0.6207
27	165	10007	422.19	0.8443
28	165	10006	535.51	1.0710
29	165	102	546.08	1.0921
30	165	91	564.98	1.1299
31	165	92	582.36	1.1647
32	165	90	673.61	1.3472
33	165	89	698.32	1.3966
34	165	101	1143.71	2.2874

El tiempo máximo de retraso del consumo se presenta del nodo 165 a 101 con aproximadamente 2.3 segundos de retraso lo que representa de 0.134 % del tiempo de agregación (30 minutos o 1800 segundos).

Dado que el orden de magnitud de los desfases generados por la elasticidad del agua es mucho menor al tiempo de ocurrencia del pulso de la demanda y la magnitud de la red no es tan extensa, para la presente tesis la elasticidad del agua prácticamente no influye en el patrón de la demanda asignado al nodo de agregación. Por lo tanto, considerar la columna de agua rígida en la presente tesis es correcto (así lo considera EPANET).

7.3.3. MÉTODO DE AGREGACIÓN DE LOS CONSUMOS DOMICILIARIOS

Como se vio en el capítulo 4. El consumo en cualquier instante de tiempo será la suma de los pulsos rectangulares coincidentes en ese instante, ver ilustración 4.1.

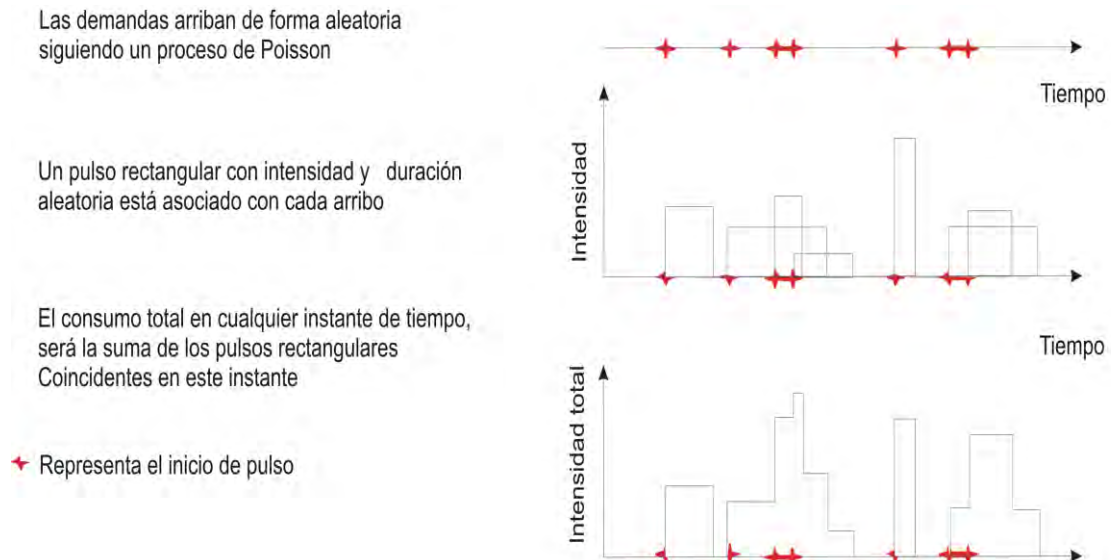


Ilustración 3-1. Representación esquemática del método de pulsos rectangulares de Poisson, PRP (Li y Buchberger, 2006).

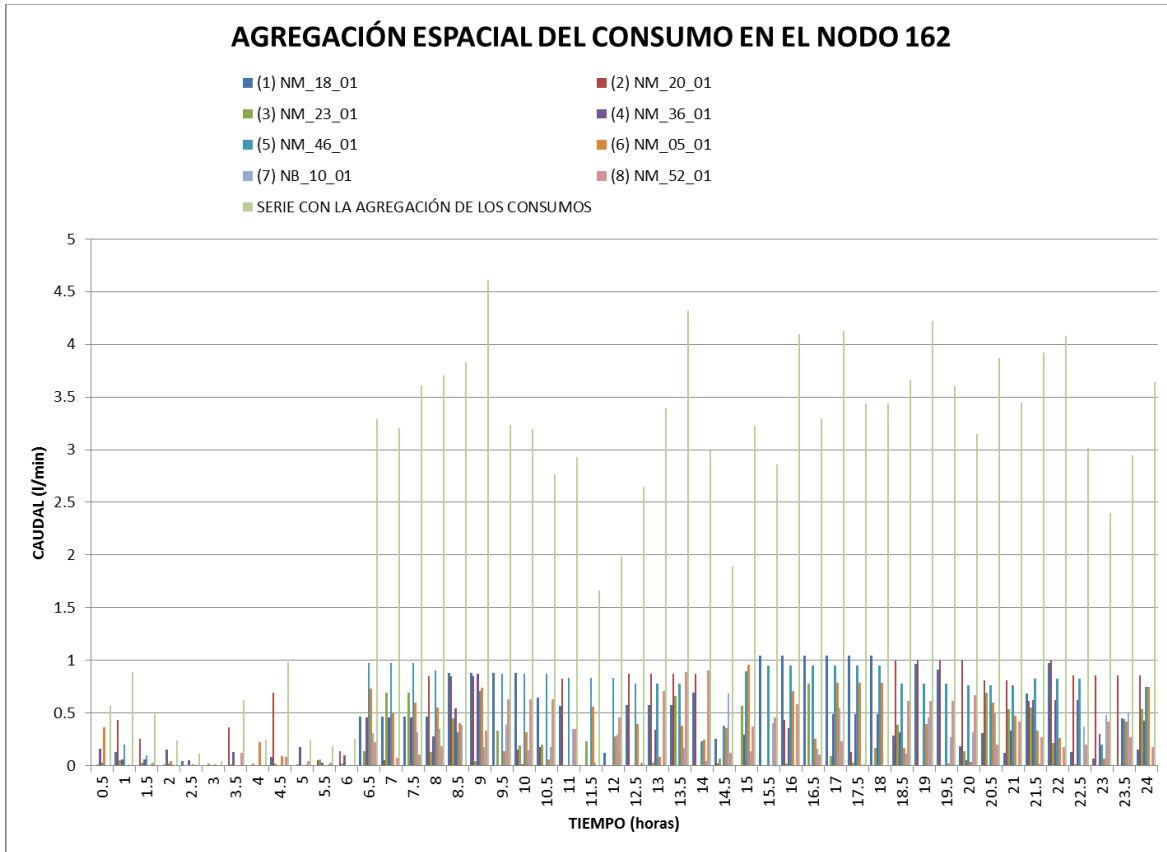
Por lo tanto la agregación de los consumos del área esqueletizada se puede considerar como la suma de los caudales de cada domicilio contenidos en dicha área, es decir, si el área de la red a simplificar tiene 8 domicilios, el patrón de la demanda introducido en el nodo de agregación es la suma de la series de consumo de cada uno de los ocho.

Con base en lo anterior se presenta en la Tabla 7-3 la agregación espacial de las primeras 24 horas de simulación realizada en el nodo 162.

Tabla 7-3. Agregación de 8 consumos para generar el patrón de la demanda del nodo 162.

TIEMPO (min)	(1) NM_18_01 (l/s)	(2) NM_20_01 (l/s)	(3) NM_23_01 (l/s)	(4) NM_36_01 (l/s)	(5) NM_46_01 (l/s)	(6) NM_05_01 (l/s)	(7) NB_10_01 (l/s)	(8) NM_52_01 (l/s)	SERIE AGREGADA (l/s)
01 - 30	0	0.00297108	0.01077024	0.15910987	0.02620128	0.36253611	0.00636844	0	0.56795702
31 - 60	0.13308828	0.43634722	0.04915546	0.06178014	0.19958011	0.000072	0.00950933	0	0.88953251
61 - 90	0	0.2541075	0.030698	0.0591634	0.10122522	0	0.0142621	0.03125849	0.49071471
91 - 120	0	0	0.01413929	0.14950934	0.02209856	0.03996597	0.01017239	0	0.23588555
121 - 150	0.04624689	0	0.00275373	0.04761305	0.00099852	0.01250678	0	0.00042551	0.11054447
151 - 180	0	0	0.0190315	0.00351527	0.00264446	0.01391544	0.00792205	0	0.04702872
181 - 210	0	0.36217572	0.01041636	0.13025488	0.00063874	0	0	0.1224826	0.62596830
211 - 240	0	0.00115904	0.01653617	0.00172763	0	0.22184647	0.00467721	0	0.24594651
241 - 270	0.08580961	0.69281326	0.02173055	0.0011566	0	0.09422858	0	0.08420394	0.97994254
271 - 300	0	0	0.01029317	0.17302364	0	0	0.01209086	0.04282106	0.23822872
301 - 330	0	0.05316104	0.05835578	0.02858905	0	0	0.01134289	0.03132234	0.18277110
331 - 360	0	0.13454803	0.01949809	0.09604578	0	0	0.00683939	0	0.25693128
361 - 390	0.46357507	0	0.13607062	0.458053	0.97519849	0.72906844	0.30758265	0.2199711	3.28951936
391 - 420	0.46357507	0.04742552	0.69273379	0.458053	0.97519849	0.49576366	0	0.07267661	3.20542613
421 - 450	0.46357507	0	0.69214738	0.458053	0.97519849	0.59962697	0.32008244	0.04282106	3.61099113
451 - 480	0.46357507	0.84552259	0.12707761	0.27916816	0.90543844	0.5537031	0.34483632	0.18322028	3.70254156
481 - 510	0.8779467	0.84552259	0.4537107	0.54370022	0.31830473	0.40488861	0.38568975	0	3.82976330
511 - 540	0.8779467	0.84552259	0.04480514	0.87513052	0.71185736	0.73868279	0.17809735	0.33543361	4.60747605
541 - 570	0.8779467	0	0.32960859	0	0.86899425	0.13840578	0.39079024	0.63148812	3.23723366
571 - 600	0.8779467	0.15353484	0.19504452	0.01433744	0.86899425	0.31337953	0.14476521	0.63148812	3.19949060
601 - 630	0.64544852	0.17688361	0.19944312	0	0.86899425	0.06245616	0.17892272	0.63148812	2.76363650
631 - 660	0.56397683	0.82676167	0.00681928	0	0.83187368	0.00028161	0.35019595	0.34953629	2.92944531
661 - 690	0	0	0.23376039	0	0.83187368	0.56355293	0.02623306	0.00523122	1.66065127
691 - 720	0.12314796	0	0.00653761	0	0.83187368	0.27712058	0.29191706	0.45482128	1.98541816
721 - 750	0.57198997	0.86939699	0	0	0.78016247	0.39829007	0	0.02696544	2.64804093
751 - 780	0.57198997	0.86939699	0.02875256	0.34407161	0.78016247	0.08605167	0	0.70739144	3.38781669
781 - 810	0.57198997	0.86939699	0.66048903	0	0.78016247	0.37776952	0.17026672	0.89108239	4.32115708
811 - 840	0.69537598	0.86939699	0	0	0.22929807	0.24728411	0.04539946	0.90498256	2.99173716
841 - 870	0.25850614	0.01911457	0.06815502	0	0.37778506	0.36009998	0.68480863	0.12285261	1.89132199
871 - 900	0	0	0.56826618	0.29675306	0.89914362	0.95530051	0.13653622	0.37488293	3.23088251
901 - 930	1.04347518	0	0	0	0.95112128	0	0.40342424	0.46175149	2.85977219
931 - 960	1.04347518	0.43635778	0.0160528	0.35780033	0.95112128	0.70595667	0	0.58257408	4.09333812
961 - 990	1.04347518	0	0.77836038	0	0.95112128	0.25224731	0.16461752	0.10615772	3.29597938
991 - 1020	1.04347518	0	0.08999733	0.48936864	0.95112128	0.78348477	0.54123638	0.22827982	4.12696340
1021 - 1050	1.04347518	0.12845267	0.02624733	0.48936864	0.95112128	0.78348477	0	0.01533597	3.43748584
1051 - 1080	1.04347518	0	0.16700222	0.48936864	0.95112128	0.78348477	0	0.00718917	3.44164125
1081 - 1110	0.28951874	0.99593755	0.38518587	0.31377667	0.78186797	0.16726456	0.11307572	0.6178682	3.66449526
1111 - 1140	0.96507711	0.99593755	0	0	0.78186797	0.39785473	0.45967156	0.6178682	4.21827711
1141 - 1170	0.91347058	0.99593755	0	0	0.78186797	0.01853741	0.27158467	0.6178682	3.59926637
1171 - 1200	0.18059788	0.99593755	0.13941333	0.05497528	0.76096496	0.03176139	0.31456686	0.67020286	3.14842010
1201 - 1230	0.30879314	0.80677525	0.69435216	0	0.76096496	0.59833556	0.50211789	0.19622268	3.86756163
1231 - 1260	0.12269911	0.80677525	0.53496249	0.33200111	0.76096496	0.46982417	0	0.41913874	3.44636582
1261 - 1290	0.68571017	0.61262517	0.55124492	0.62283148	0.82200384	0.33326633	0.02333536	0.27103074	3.92204801
1291 - 1320	0.97741956	0.99991924	0.21671663	0.62283148	0.82200384	0.26455814	0	0.1751388	4.07858770
1321 - 1350	0.13155008	0.85965797	0.01461564	0.62283148	0.82200384	4.69E-05	0.37091144	1.96E-01	3.01784001
1351 - 1380	0.06850867	0.85965797	0	0.30183189	0.19638763	0.06858167	0.48144478	0.41913874	2.39555134
1381 - 1410	0	0.85965797	0	0.45077084	0.44386448	0.41985406	0.49967078	0.27103074	2.94484887
1411 - 1440	0.15213116	0.85965797	0.5398083	0.42373117	0.74807972	0.74558709	0	0.1751388	3.64413421

La Gráfica 7-9. esquematiza, en las primeras 24 horas, la agregación de los consumos en el nodo 162. Son ocho diferentes patrones de consumo que se suman y generan el patrón de la demanda asignada al nodo de agregación 162.



Gráfica 7-9. Agregación de los consumos en el nodo 162.

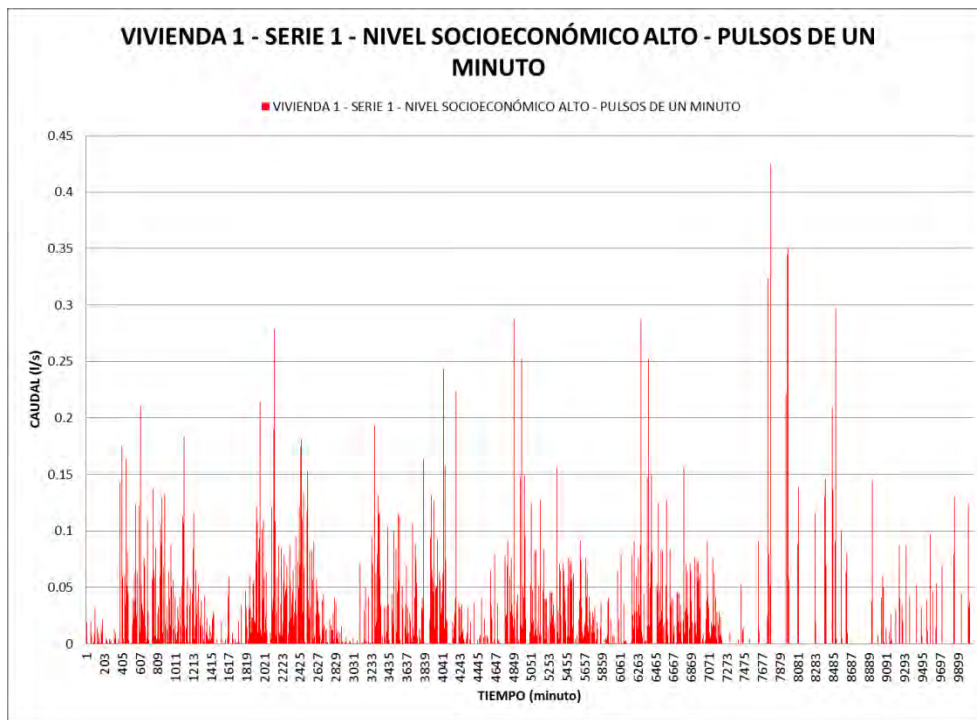
Todas las series, ya sea las empleadas por cada casa habitación, así como la serie con la agregación de los ocho patrones de consumos, tienen un comportamiento diferente entre sí, esto no ocurre así cuando se emplea la CVHD, ya que la curva de la demanda es la misma, por ende al agregar los consumos solo cambia la magnitud de la curva más no su comportamiento. Esta es una de las principales aportaciones del empleo del esquema estocástico, ya que en todo nodo de agregación se genera un patrón de demanda diferente, situación que ocurre en la realidad. Por lo tanto, los patrones de demanda asignados a los nodos de agregación, bajo el esquema estocástico, se apegan mejor que las agregadas bajo el esquema de la CVHD a la realidad.

8. APLICACIÓN DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

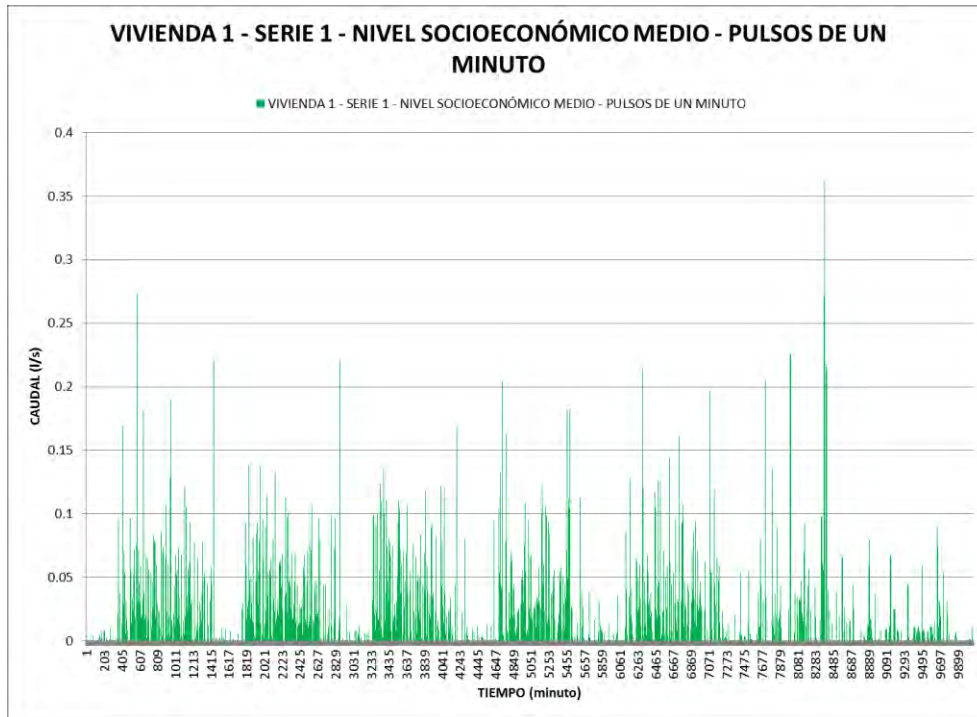
8. APLICACIÓN DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Se aplica una semana (168 horas) de simulación en el modelo hidráulico. Las series sintéticas disponibles en la base de datos se dividen en 8 bloques horarios, ver Tabla 6-1, por lo tanto primero se realiza el ensamble de 50 series semanales de consumo por cada domicilio, obteniendo así, 50 series con 10 080 datos para cada domicilio; ninguna serie es igual a otra. Sin embargo la vivienda 6 de nivel socioeconómico medio no tiene la información necesaria para el ensamble, por lo que se omite esta vivienda, de esta forma se generan 3400 series sintéticas. Debido a la cantidad de información ésta se presenta en el Anexo digital 1.

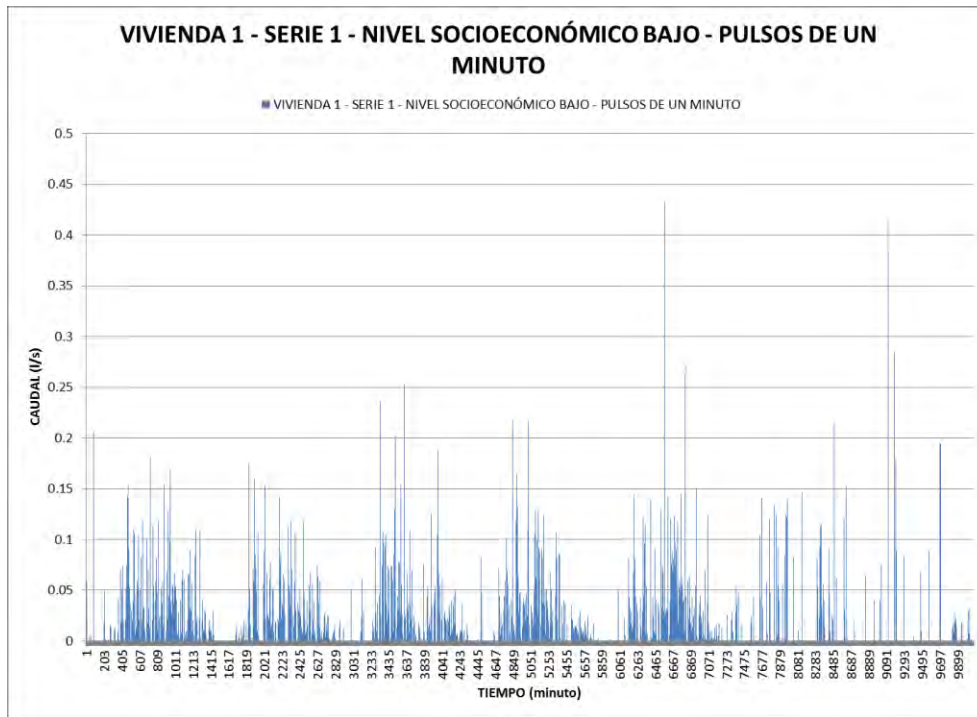
Como ejemplo se muestra el procedimiento para la serie 1 de la vivienda 1 de cada nivel socioeconómico, es decir, la serie sintética de la vivienda 1- serie 1 – nivel socioeconómico alto; la vivienda 1 – serie 1 – nivel socioeconómico medio; la vivienda 1 – serie 1 - nivel socioeconómico bajo; ver Gráfica 8-1., 8-2. y 8-3, respectivamente.



Gráfica 8-1. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico alto.



Gráfica 8-2. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico medio.

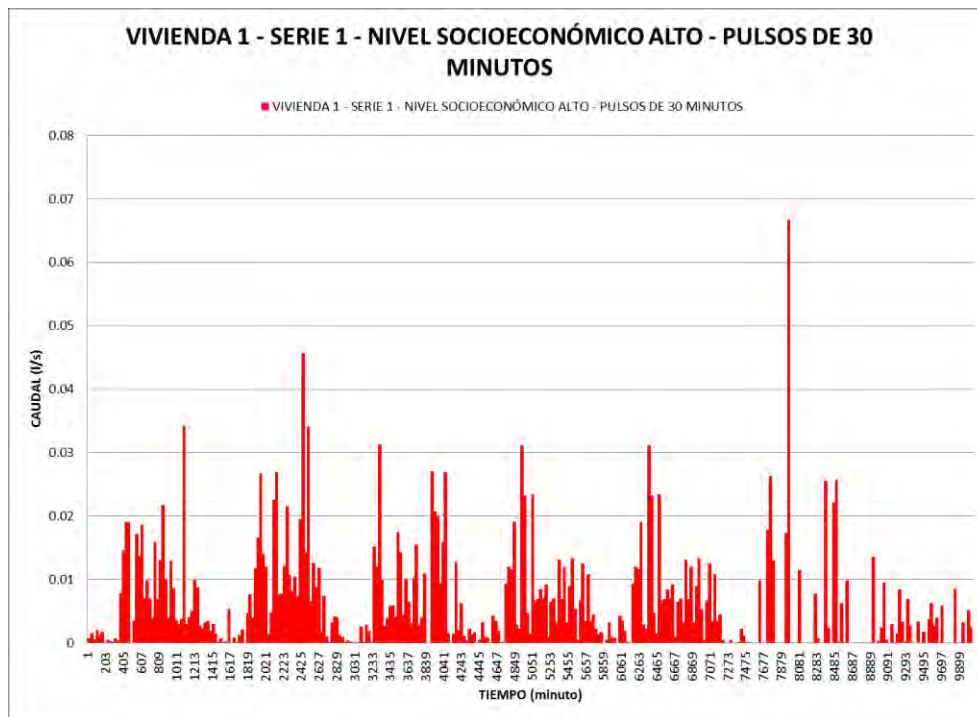


Gráfica 8-3. Serie sintética a cada minuto, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico bajo.

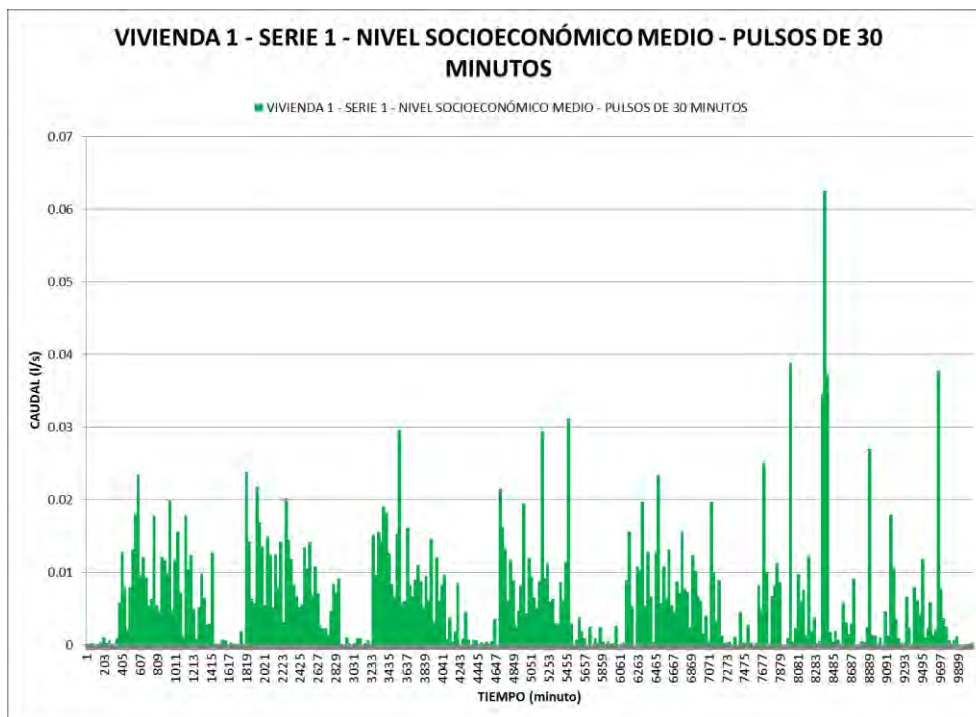
El comportamiento hidráulico de cada día de la semana es diferente, la serie inicia en lunes y finaliza en domingo, el comportamiento empleando el esquema con la CVHD es igual todos los días. Otra ventaja de emplear el esquema de NSRPM es que se obtienen series diferentes para los fines de semana (situación que ocurre en la realidad) e introducirlas en el modelo de simulación hidráulica, logrando así mayor apego de los resultados con la realidad.

8.1. RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN TEMPORAL

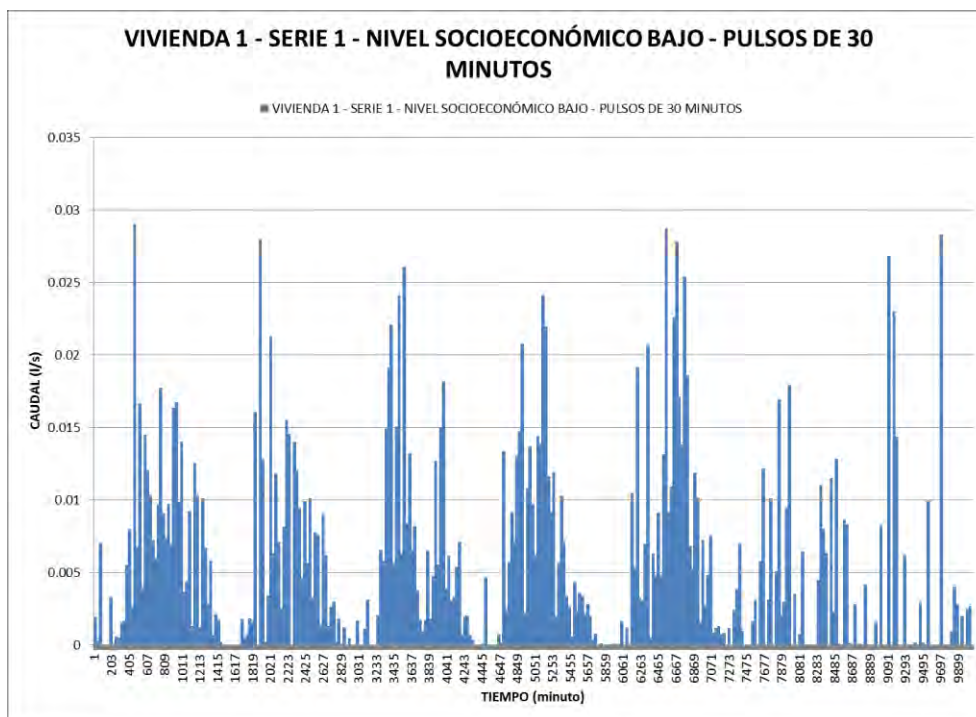
El tiempo de agregación empleado se determina en el capítulo anterior (30 minutos), por lo tanto se ensamblan 3400 series sintéticas con pulsos de 30 minutos, 300 para el nivel socioeconómico alto, 2600 para el nivel socioeconómico medio y 500 para el nivel socioeconómico bajo. Las Gráficas 8-4, 8-5 y 8-6 muestran el resultado de la agregación temporal, de las series 1 y viviendas 1 de cada nivel socioeconómico.



Gráfica 8-4. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico alto.



Gráfica 8-5. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico medio.



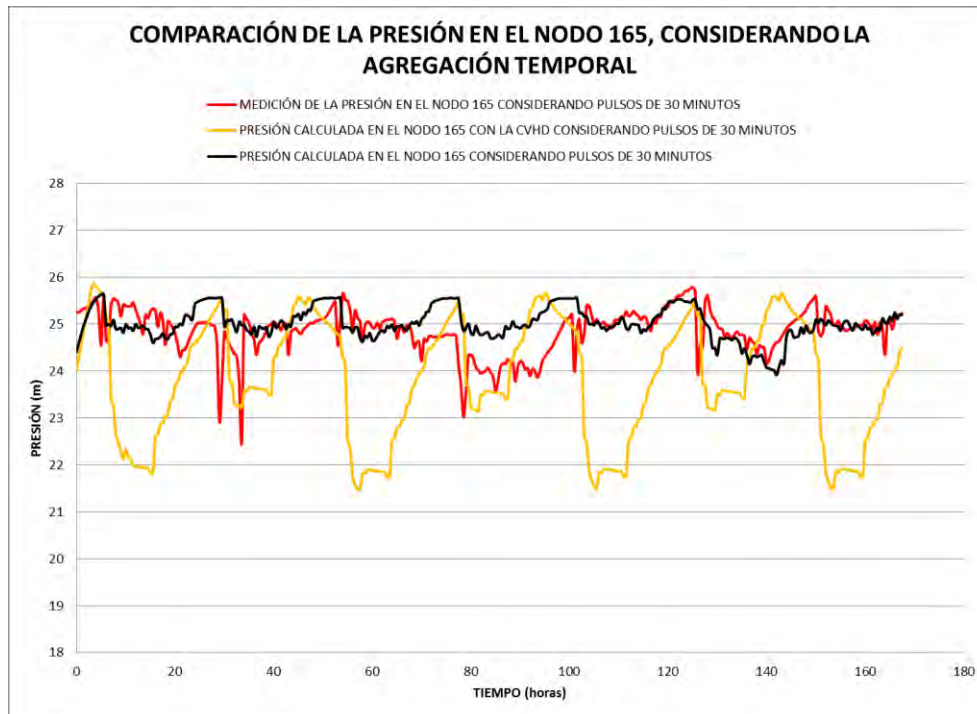
Gráfica 8-6. Serie sintética a 30 minutos, vivienda 1-serie 1-nivel socioeconómico bajo.

Los picos o intensidades máximas que ocurren en la serie a cada minuto disminuyen con la agregación temporal, por ejemplo, para el nivel socioeconómico alto, la intensidad máxima de 0.420 l/s se transforma en un pulso de 0.067 l/s, para el socioeconómico medio de 0.352 l/s a 0.062 l/s y para el nivel socioeconómico bajo de 0.425 l/s a 0.028 l/s. Estos resultados muestran que la agregación temporal permite que las series tengan un comportamiento con mayor apego a la realidad.

8.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN TEMPORAL CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS

Los puntos de control en el modelo son el nodo 165 y la tubería 2957, ver Ilustración 6-2. En el nodo 165 se estudia el comportamiento de la presión, mientras que en el tramo (tubería) 2957 se estudia el comportamiento del caudal.

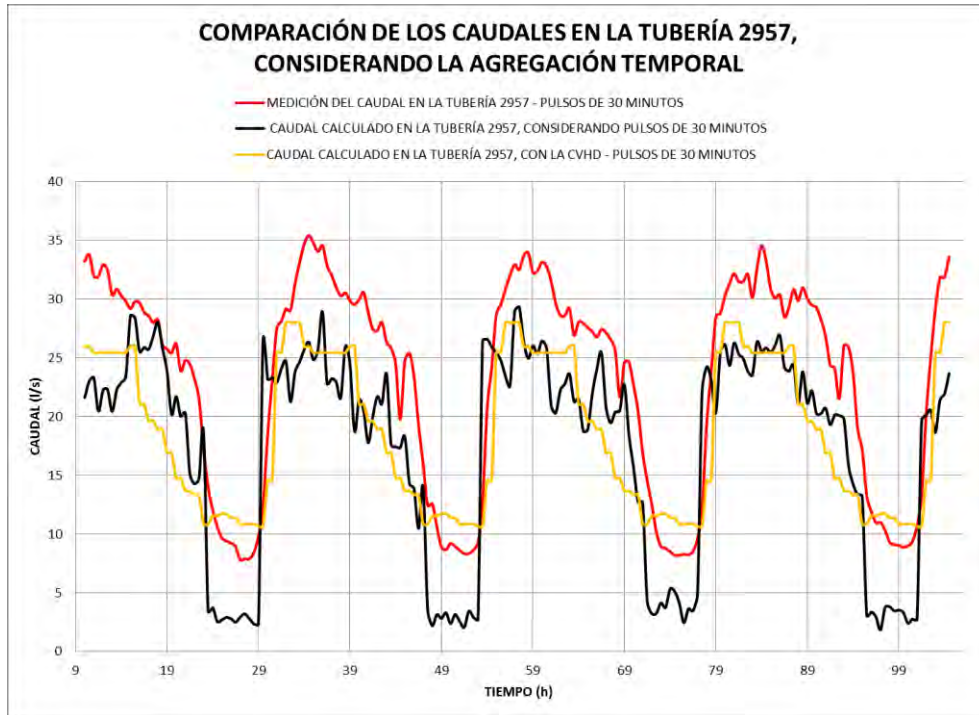
La Gráfica 8-7 muestra la comparación de las presiones en el nodo165, obtenidas de la medición, el empleo de la CVHD y las series con agregación de 30 minutos.



Gráfica 8-7. Presión en el nodo 165 considerando la agregación temporal de 30 minutos.

Es importante notar que la curva obtenida con la agregación temporal tiene un comportamiento con mayor apego a la realidad en comparativa con la obtenida con la CVHD.

La Gráfica 8-8. compara los caudales en la tubería 2957, obtenidas de la medición, el empleo de la CVHD y las series con agregación de 30 minutos.



Gráfica 8-8. Caudal en la tubería 2957 considerando la agregación temporal de 30 minutos.

La curva del caudal obtenido con la agregación temporal se apega mejor a la medición (comportamiento real de la red), sin embargo el caudal es menor en un 25 % aproximadamente, debido a que la medición incluye las fugas en la red y la serie agregada no (las series agregadas vienen de mediciones en los domicilios), es decir, la red en esa zona presenta un 25 % de fugas, situación promedio, sí consideramos el promedio nacional. El caudal obtenido empleando la CVHD no permite determinar estas fugas, ya que su origen no proviene de la mediciones directas de la zona.

8.3. RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL

Con la agregación temporal de las series, se procede a simplificar la red. De nuevo se consideran los puntos de control en el nodo 165 y la tubería 2957, además se considera el comportamiento en el nodo 3013 que es el nodo afectado de forma directa con el caudal que transita en la tubería 2957. De igual forma emplean las series con pulsos de 30 minutos en todos los casos.

Para la agregación espacial se consideraron 3 niveles de agregación y dos criterios diferentes para obtener los nodos de agregación, uno es el punto de equilibrio y el otro es considerando la zonas.

El nivel 1 de agregación considera simplificar las tuberías menores o iguales a 76.2 mm de diámetro.

El nivel 2 de agregación considera simplificar las tuberías menores o iguales a 152.4 mm de diámetro

El nivel 3 de agregación considera simplificar las tuberías menores o iguales a 254.0 mm de diámetro

La Ilustración 8-1 muestra el esquema empleado en la agregación espacial, considerando los dos diferentes métodos y los diferentes niveles de agregación.

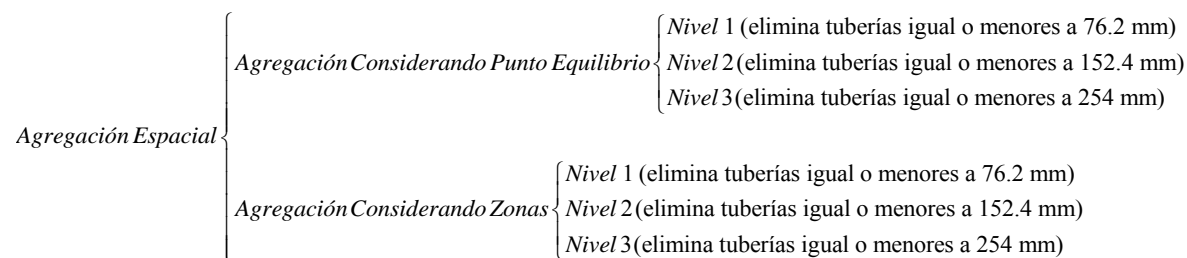


Ilustración 8-1. Esquema empleado en la agregación espacial.

Los criterios empleados para la simplificación de la red se describen en el capítulo anterior. En la Ilustración 8-2, se muestra un ejemplo de la simplificación de la red tomando en cuenta los diferentes niveles de agregación, caso de la tubería 2957, ubicada en el Sector Sur del sitio de aplicación.

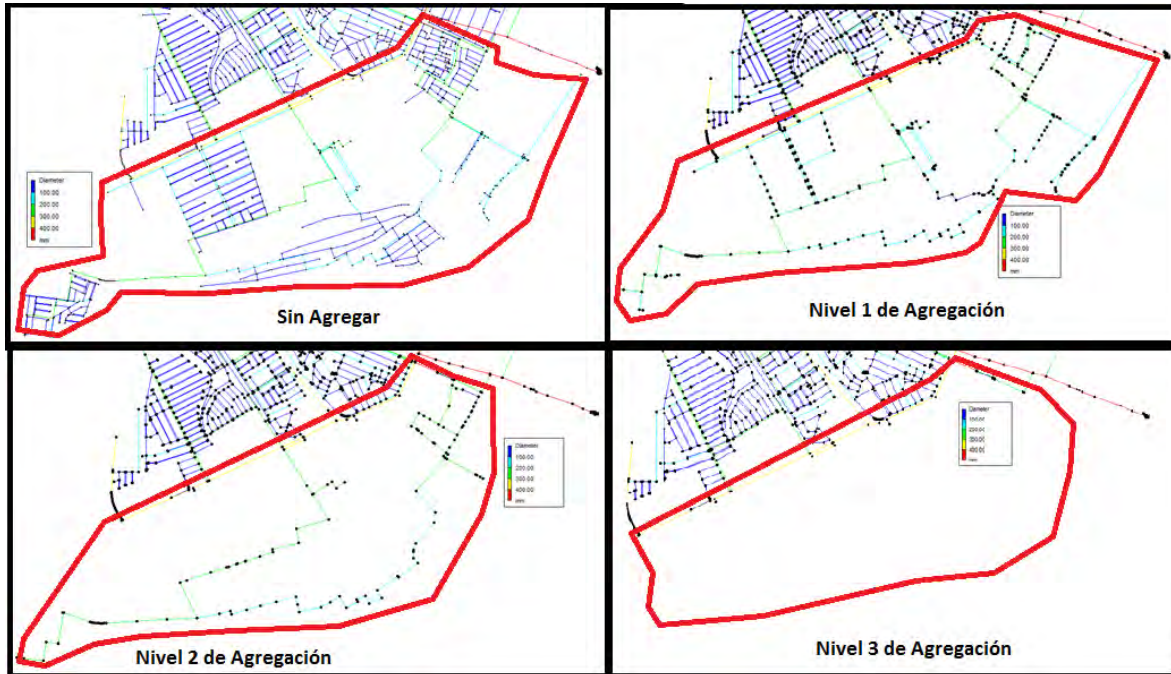


Ilustración 8-2. Diferentes niveles de agregación para la tubería 2957 (Sector Sur).

En la Ilustración anterior se aprecia como las tuberías van disminuyendo según el nivel de agregación, se simplifica la red hasta dejar las tuberías con el diámetro del punto de control, en este caso el tramo 2957 tiene un diámetro de 304.8 mm.

8.3.1. NODOS DE AGREGACIÓN INVOLUCRADOS EN EL NIVEL UNO, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Se toman 49 nodos de agregación en el Sector Sur y Norte, sitios en donde se ubican los puntos de control (nodo 165 y tramo 2957), estos 49 nodos son los que reciben alguna modificación en su patrón de la demanda por efecto de la agregación en el primer nivel, y sustituyen el consumo de los nodos eliminados. La Tabla 8-1 numeran los nodos de agregación del nivel uno.

Tabla 8-1. Nodos de agregación empleados en el nivel 1, considerando el punto de equilibrio.

ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO
1	24	11	166	21	1475	31	1339	41	465
2	25	12	126	22	1352	32	1963	42	530
3	1997	13	167	23	1354	33	2240	43	451
4	1998	14	168	24	1400	34	1318	44	462
5	1995	15	141	25	1392	35	424	45	510
6	1996	16	186	26	1696	36	405	46	494
7	1431	17	1433	27	2239	37	2221	47	496
8	1432	18	218	28	1349	38	1545	48	498
9	164	19	3009	29	2129	39	1556	49	502
10	165	20	1452	30	1383	40	1560		

Se presenta como ejemplo de la simplificación de la red en el nivel 1, dos de los 49 nodos de agregación, estos son el nodo 141 y 1475, ver las ilustraciones 8-3 y 8-4 respectivamente. El primero corresponde al Sector Norte y el segundo al Sector Sur del sitio de estudio.

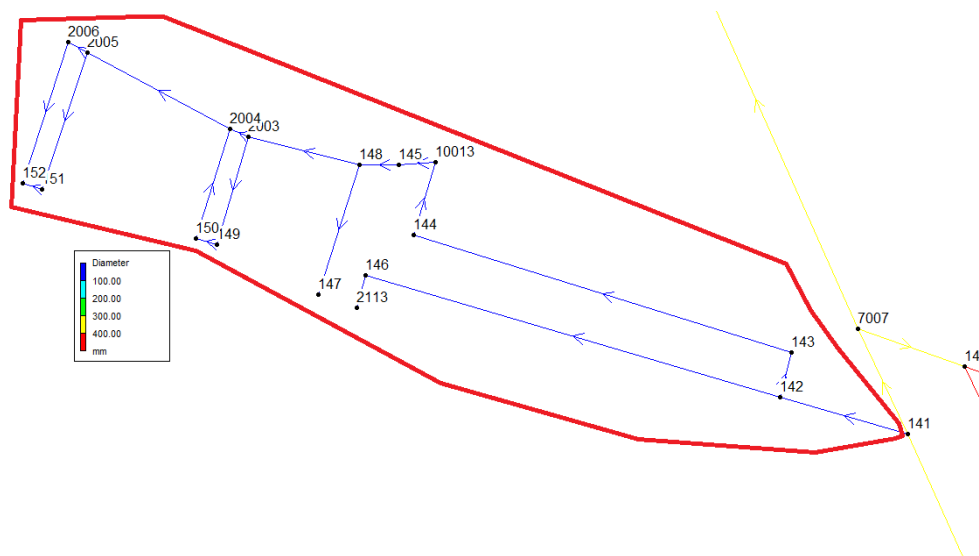


Ilustración 8-3. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 141, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.

De la ilustración anterior se observan que los nodos que se eliminan y cuyos consumos se agregan en el nodo 141 son: 2006, 2005, 152, 151, 2004, 2003, 150, 149, 148, 145, 10013, 144, 146, 147, 2113, 143 y 142, esto ocurre después de la agregación considerando punto de equilibrio en el nivel 1. Por lo tanto después de la agregación, el nodo 141 representa el consumo de estos 17 nodos eliminados.

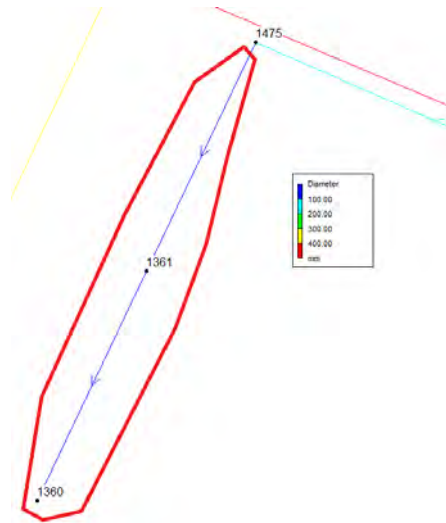
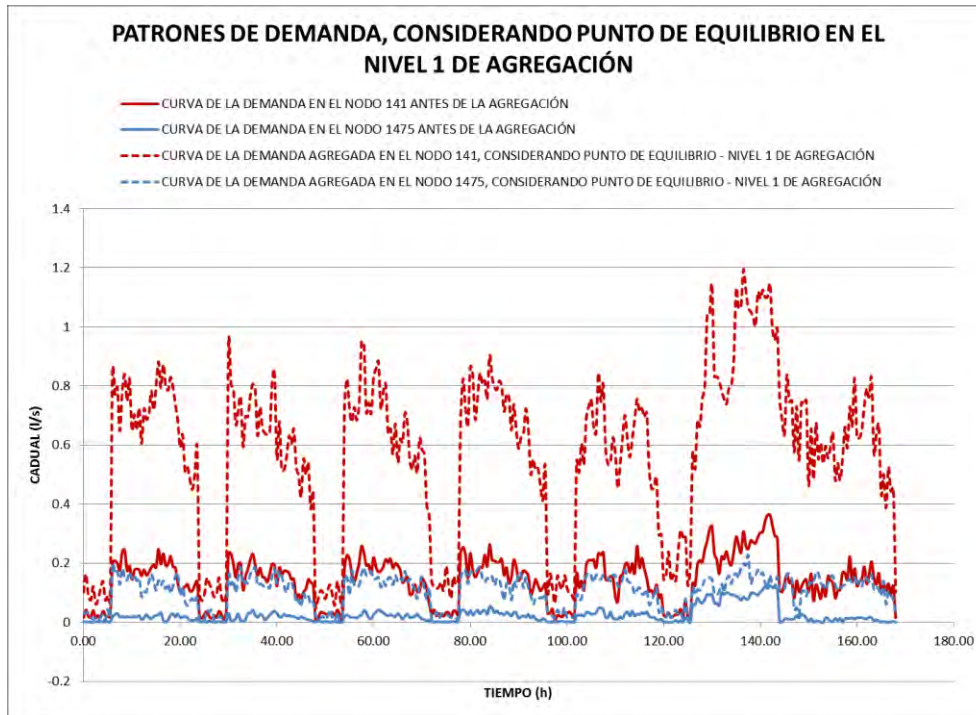


Ilustración 8-4. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1475, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.

De la ilustración 8-4, se observa que los nodos que se eliminan y cuyos consumos se agregan en el nodo 1475 son: 1360 y 1361, esto ocurre después de la agregación considerando punto de equilibrio en el nivel 1. Por lo tanto después de la agregación, el nodo 1475 representa el consumo de estos dos nodos eliminados.

Los patrones de la demanda introducidos en el nodo 141 y 1475 del modelo de simulación hidráulica, después de la agregación considerando punto de equilibrio en el nivel 1 se muestran en la Gráfica 8-9.



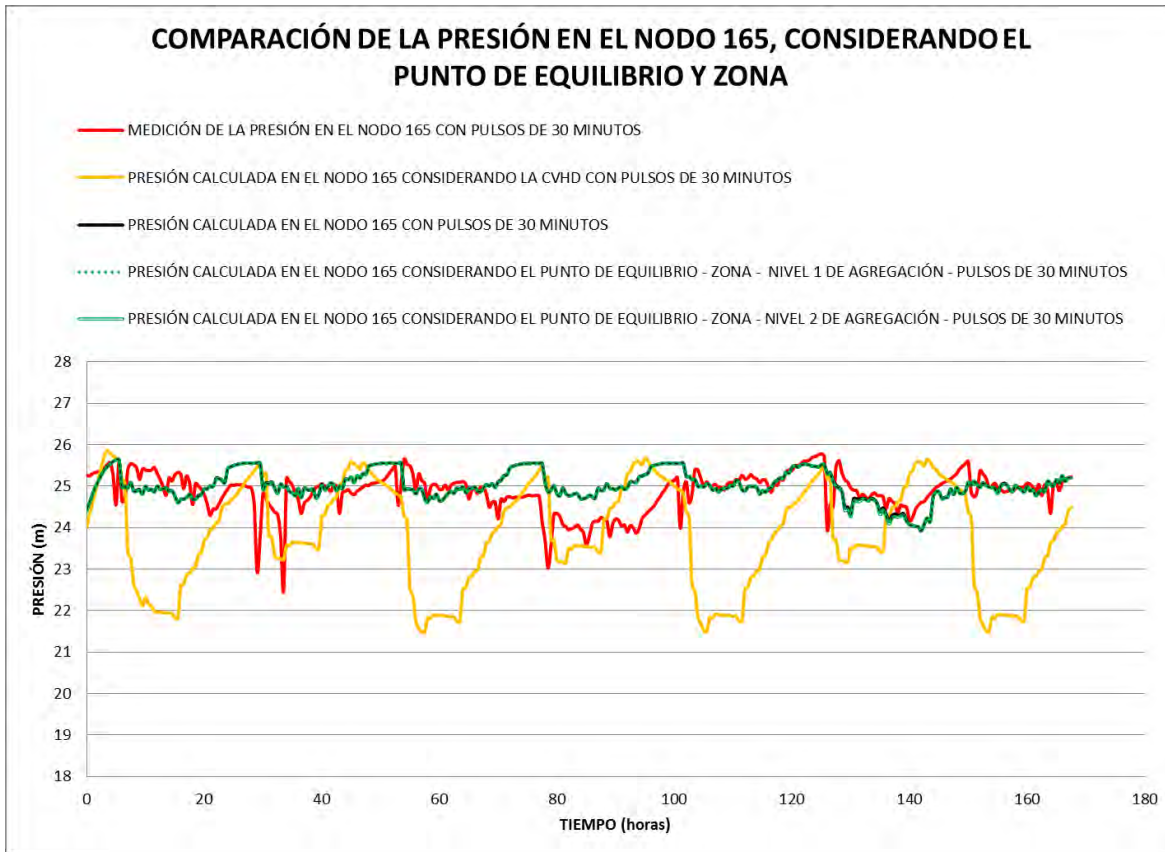
Gráfica 8-9. Curvas de la demanda de los nodos de agregación 141 y 1475, después de la agregación considerando el punto de equilibrio en el nivel 1.

El patrón de consumo generado con la agregación espacial para el nodo 141 incluye 100 tomas domiciliarias, mientras que para el nodo 1475 son 24 tomas. Esto se refleja claramente en la diferencia de caudal demandado entre un nodo y otro. Por otro lado es importante notar el comportamiento de la curva asignada para un nodo u otro no es igual. Además el patrón de la demanda de un día (24 horas) no se repite en la semana.

Un procedimiento similar se realiza para cada uno de los 49 nodos de agregación en el primer nivel. En el Anexo digital 2 se muestran los patrones de demanda introducidos en cada nodo de agregación de la red de abastecimiento.

8.3.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL UNO DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

La Gráfica 8-10. compara en el nodo 165 la presión obtenida de la medición, el empleo de la CVHD, las series con agregación de 30 minutos y el primer nivel de agregación, considerando el punto de equilibrio.



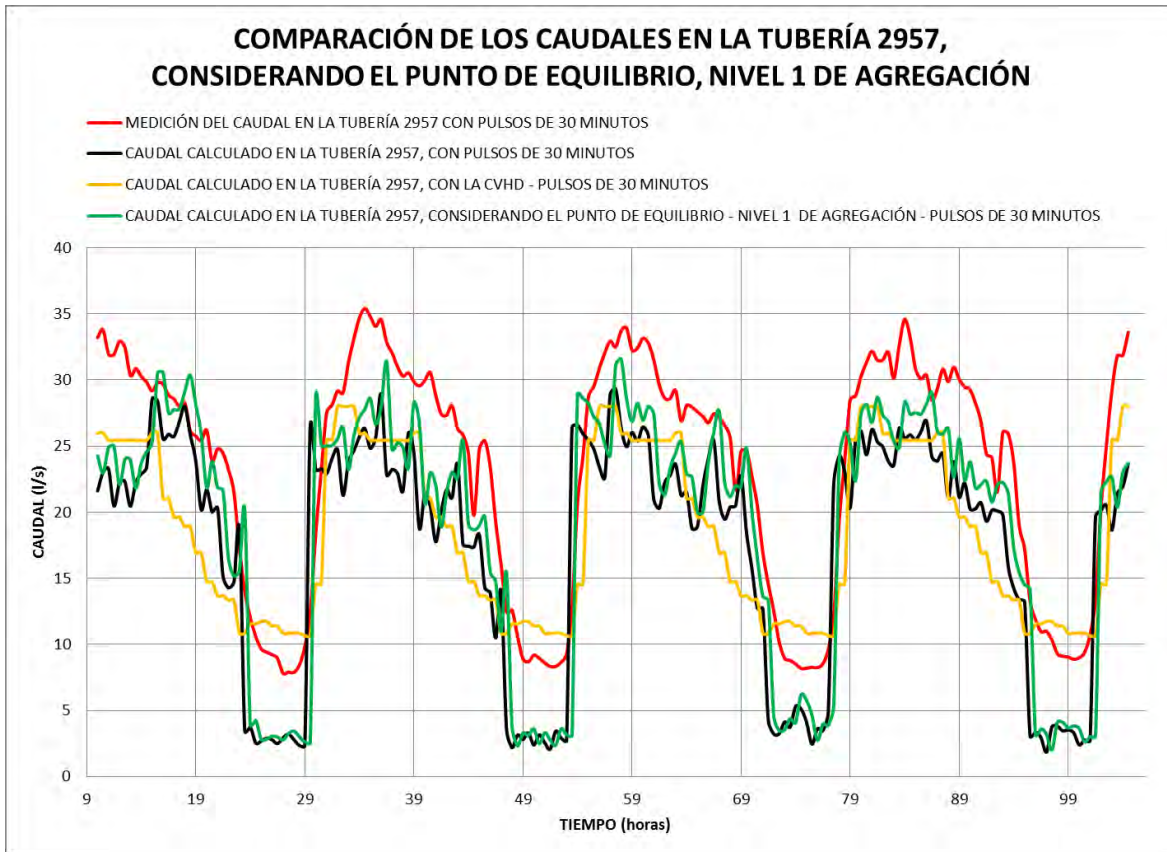
Gráfica 8-10. Presión en el nodo 165, considerando el punto de equilibrio, nivel 1 de agregación.

No hay una diferencia notable de la presión en el nodo 165 antes y después de la agregación de nivel 1. Esto debido a que los ramas agregadas son sectores aislados, por lo tanto el caudal que transita en el nodo 165 no varía.

La Gráfica 8-11. compara en la tubería 2957 los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD y el primer nivel de agregación, considerando el punto de equilibrio.

El caudal en la tubería 2957 difiere antes y después de la agregación, el promedio del caudal antes de la agregación es 17.36 l/s aproximadamente y después de la agregación 18.71 l/s; esta diferencia es de 1.35 l/s y representa 7.84 % más caudal que el ocurrido antes de la agregación.

Por otro lado la diferencia entre la medición y el caudal promedio en el nivel 1 de agregación es de 4.45 l/s, es decir, 19.21 % menos de lo medido.



Gráfica 8-11. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 1 de agregación.

Esta tubería originalmente sirve aproximadamente a 3316 tomas domiciliarias (la red es mallada y diferentes tuberías abastecen la misma zona), con el nivel 1 de agregación esta tubería atiende a 3056 tomas domiciliarias, es decir, se desvió el consumo de 260 tomas domiciliarias.

Por otro lado, es importante revisar cuánto afecta el cambio de caudal en la presión en el nodo adyacente, en la Gráfica 8-12 se presentan el comportamiento de la presión en el nodo 3013 correspondiente a la tubería 2957.



Gráfica 8-12. Presión en el nodo 3013, considerando el punto de equilibrio, nivel 1 de agregación.

No hay gran variación de la presión en el nodo 3013, antes y después del nivel 1 de agregación, considerando el punto de equilibrio.

Con base en lo anterior, podemos concluir de forma preliminar que los cambios originados por la agregación espacial considerando el punto de equilibrio no son importantes en la presión, sin embargo el caudal promedio desviado con respecto a la medición es de 4.45 l/s, esto representa un desvío del 19.21 %. Sí se compara el caudal desviado con respecto al cálculo obtenido de la red completa, se desvía 1.36 l/s y representa el 7.8 % del caudal medido en la red completa. Por lo tanto con la agregación espacial el caudal se redistribuye en la red.

8.3.3. NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Se toman 14 nodos de agregación en el Sector Sur y Norte, sitios en donde se ubican los puntos de control (nodo 165 y tramo 2957), estos 14 nodos son los que reciben alguna modificación en su patrón de la demanda por efecto de la agregación en el segundo nivel, y sustituyen el consumo de los nodos eliminados. La Tabla 8-2 numeran los nodos de agregación del nivel dos.

Tabla 8-2. Nodos de agregación empleados en el nivel 2 de agregación, considerando el punto de equilibrio.

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NODO	162	170	219	188	438	1480	832	446	1628	422	841	1294	1356	3035

Se presenta como ejemplo de la simplificación de la red en el nivel 2, dos de los 14 nodos de agregación, estos son el nodo 219 y 1356, ver ilustraciones 8-5 y 8-6 respectivamente. El primero corresponde al Sector Norte y el segundo al Sector Sur del sitio de estudio.

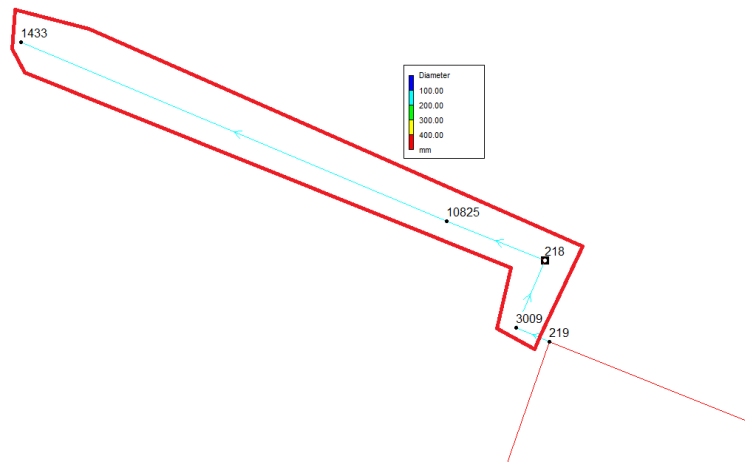


Ilustración 8-5. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 219, considerando el punto de equilibrio en el nivel 2.

De la ilustración anterior se observan que los nodos que se eliminan y cuyos consumos se agregan en el nodo 219 son: 1433, 10825, 218 y 3009, esto ocurre después de la agregación considerando

punto de equilibrio en el nivel 2. Por lo tanto después de la agregación, el nodo 219 representa el consumo de estos 4 nodos eliminados.

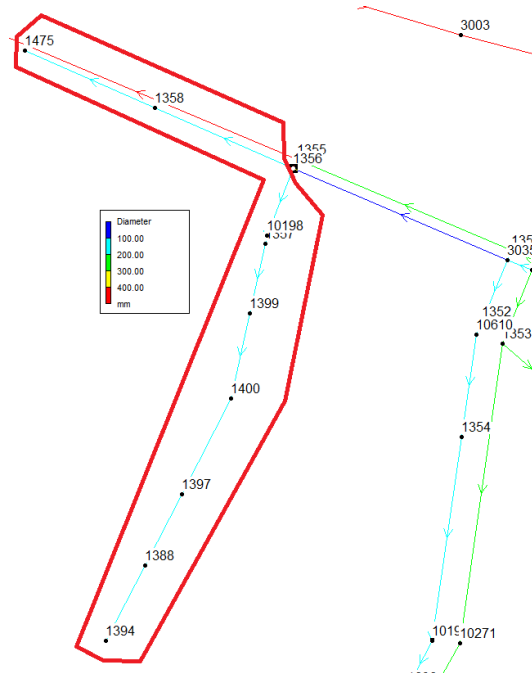
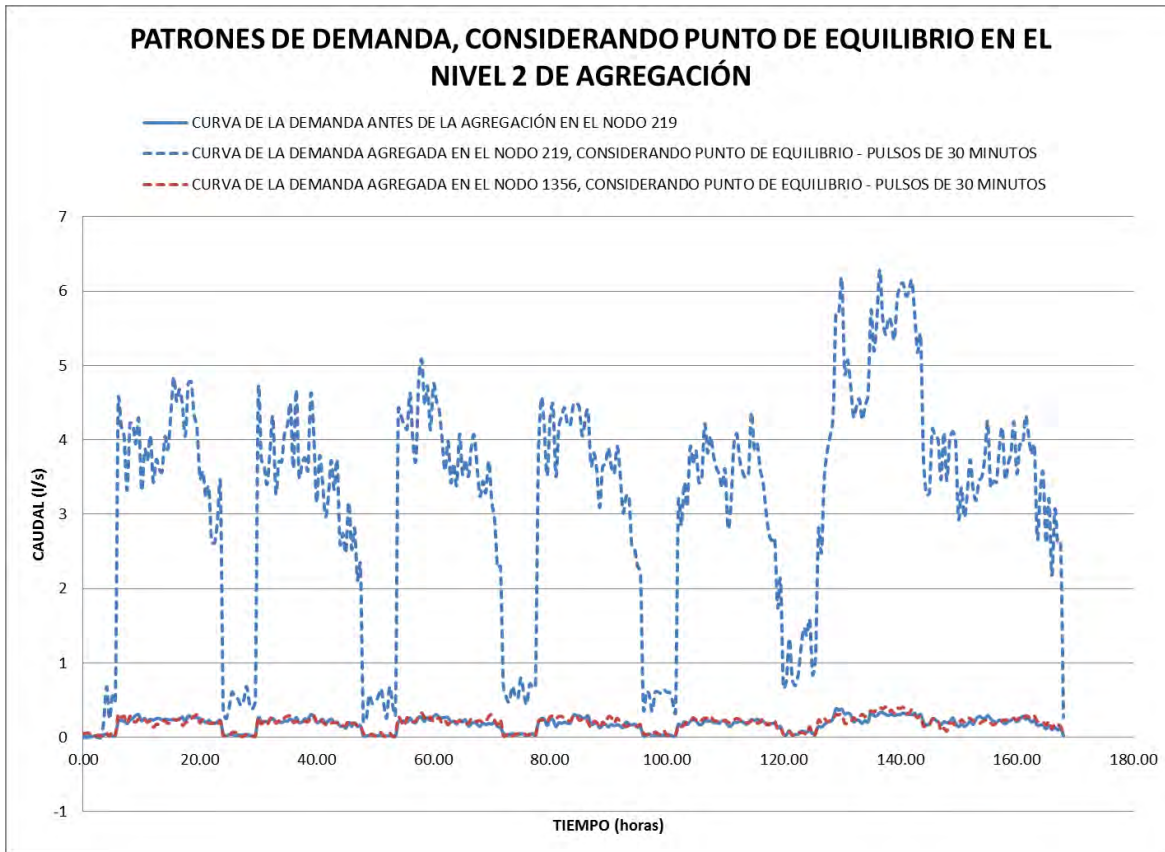


Ilustración 8-6. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1356, considerando el punto de equilibrio en el nivel 2.

De la ilustración anterior se observan que los nodos que se eliminan y cuyos consumos se agregan en el nodo 1356 son: 1475, 1358, 1394, 1388, 1397, 1400, 1399, 10198 y 1357, esto ocurre después de la agregación considerando punto de equilibrio en el nivel 2. Por lo tanto después de la agregación, el nodo 1356 representa el consumo de estos nueve nodos eliminados. Es notable mencionar que el nodo 1356 absorbe en el nivel de agregación al nodo 1475 que fue nodo de agregación en el nivel 1. Además que originalmente el nodo 1356 no tiene ninguna demanda asignada.

Los patrones de la demanda introducidos en el nodo 219 y 1356 del modelo de simulación hidráulica, después de la agregación considerando punto de equilibrio en el nivel 2 se muestran en la gráfica 8-13.



Gráfica 8-13. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 219 y 1356 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.

El patrón de la demanda generado para el nodo 219, sirve a 663 tomas domiciliarias, mientras que el nodo 1356 a 34 tomas. De ahí la diferencia de caudales en la curva de la demanda. Por otro lado de las ilustraciones 8.4, 8.5 y la Gráfica 8.13 se ve que en el nivel 2 de agregación no influye la cantidad de nodos que se agregan, sino la suma de los patrones de consumos que tienen los nodos agregados.

8.3.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

La Gráfica 8.14. muestra la presión en el nodo de control 165 obtenidas de la medición, el empleo de la CVHD, las series con agregación de 30 minutos, con el primer nivel de agregación y el nivel 2 de agregación, considerando el punto de equilibrio.



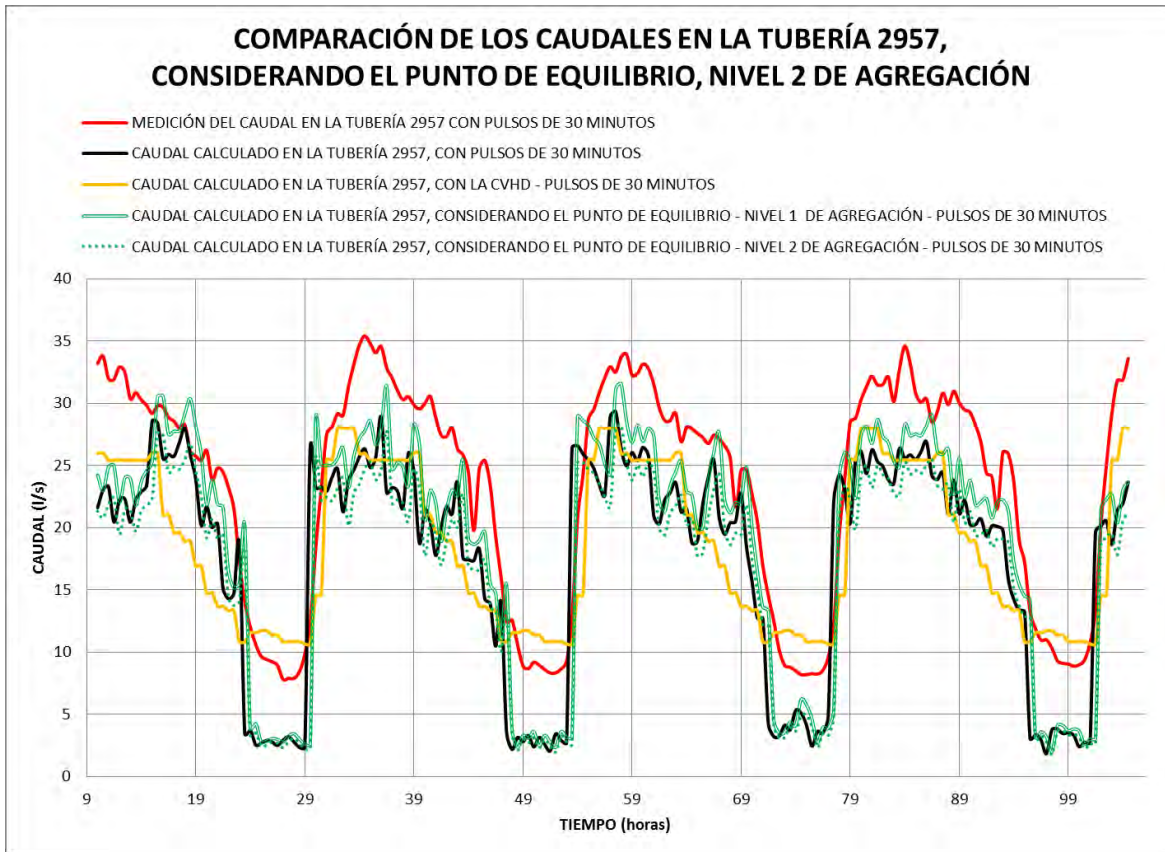
Gráfica 8-14. Presión en el nodo 165 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.

En la gráfica anterior no se observa alguna variación considerable de la presión entre el nivel de agregación 1 y el nivel de agregación 2. Esto debido a que en el Sector norte la mayoría de las ramas por simplificar son redes con aisladas y por lo tanto la redistribución del caudal es mínima.

La Gráfica 8-15. compara en la tubería 2957 los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD y el nivel 1 de agregación y el nivel 2 de agregación, considerando el punto de equilibrio.

El promedio del caudal en el nivel 2 de agregación es 16.6 l/s aproximadamente, este caudal se apega mejor al caudal promedio antes de simplificar la red (17.36 l/s) que el obtenido en la agregación del nivel 1 (18.71 l/s) promedio, sin embargo se aleja más del caudal medido.

Esta nota es importante, ya que si se calcula las fugas con el caudal del nivel 2 de agregación, entonces las fugas estimadas serán mayores que las reales, y el error se debe al método y el nivel de agregación espacial de los consumos. La diferencia entre el caudal en el nivel 2 de agregación y el caudal antes de simplificar la red es de 0.756 l/s y representa 4.356 % menos.



Gráfica 8-15. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 2 de agregación.

Por otro lado la diferencia entre la medición y el caudal promedio en el nivel 2 de agregación es de 6.56 l/s, es decir el 28.35 % menos que lo medido.

En el nivel 2 de agregación el caudal de 144 tomas domiciliarias se desvía, por lo tanto, el caudal en el nivel 2 es menor que antes de la agregación. A diferencia del nivel 1 de agregación donde se agrega a la tubería el caudal del 260 tomas domiciliarias.

Con base en lo anterior la diferencia del caudal en el nivel 1 y el nivel 2 de agregación corresponde a 404 tomas domiciliarias.

En la Gráfica 8-16, se presenta la presión en el nodo 3013 que corresponde a la tubería 2957.



Gráfica 8-16. Presión en el nodo 3013 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.

Existe variación en la presión en el nodo 3013 con el nivel 2 de agregación, esto se debe a la disminución del caudal en el nodo, ya que al transportar menos caudal la presión aumenta, sin embargo estas diferencias en la curva de la presión no son importantes.

Por lo tanto hasta el momento el nivel de agregación 2 es mejor que el nivel 1, ya que desvía menos caudal que el nivel 1, esto ocurre debido al empleo del método del punto de equilibrio que respeta el camino más probable del flujo.

8.3.5. NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL TRES DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Los nodos de agregación en el nivel 3 son el 3013 y 832, en el Anexo digital 2 se muestran los patrones de demanda introducidos en los nodos.

En la Ilustración 8-7. presenta el área de influencia correspondiente a cada nodo, por ende los nodos agregados.

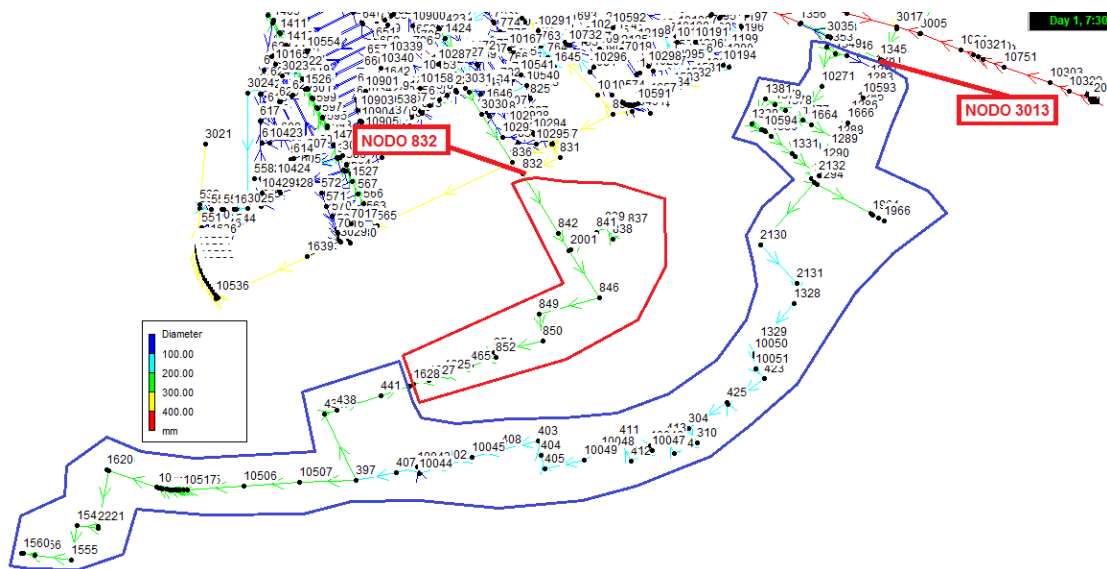
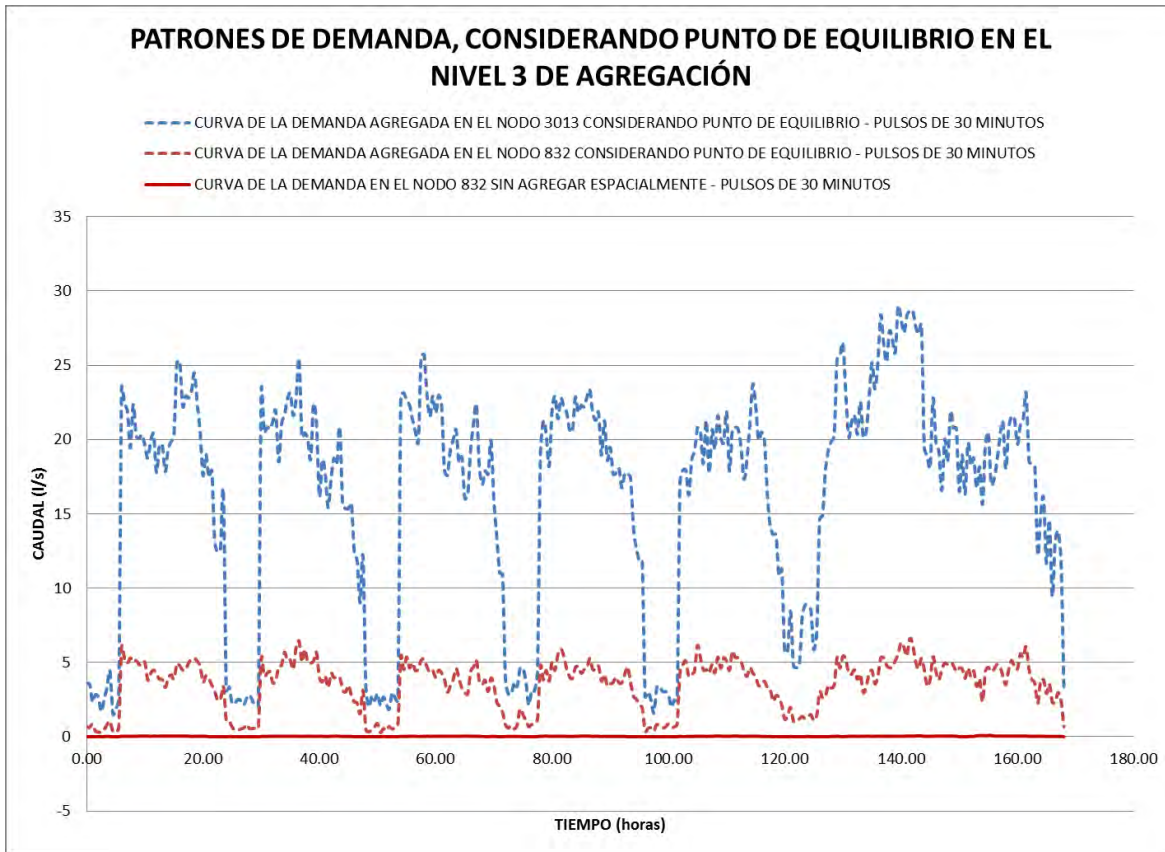


Ilustración 8-7. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 3013 y 832 considerando el punto de equilibrio y nivel 3 de agregación.

Los nodos encerrados en azul se agregan al nodo 3013 y los encerrados en rojo al 832, los patrones de demanda introducidos en el modelo hidráulico se muestran en la Gráfica 8-17



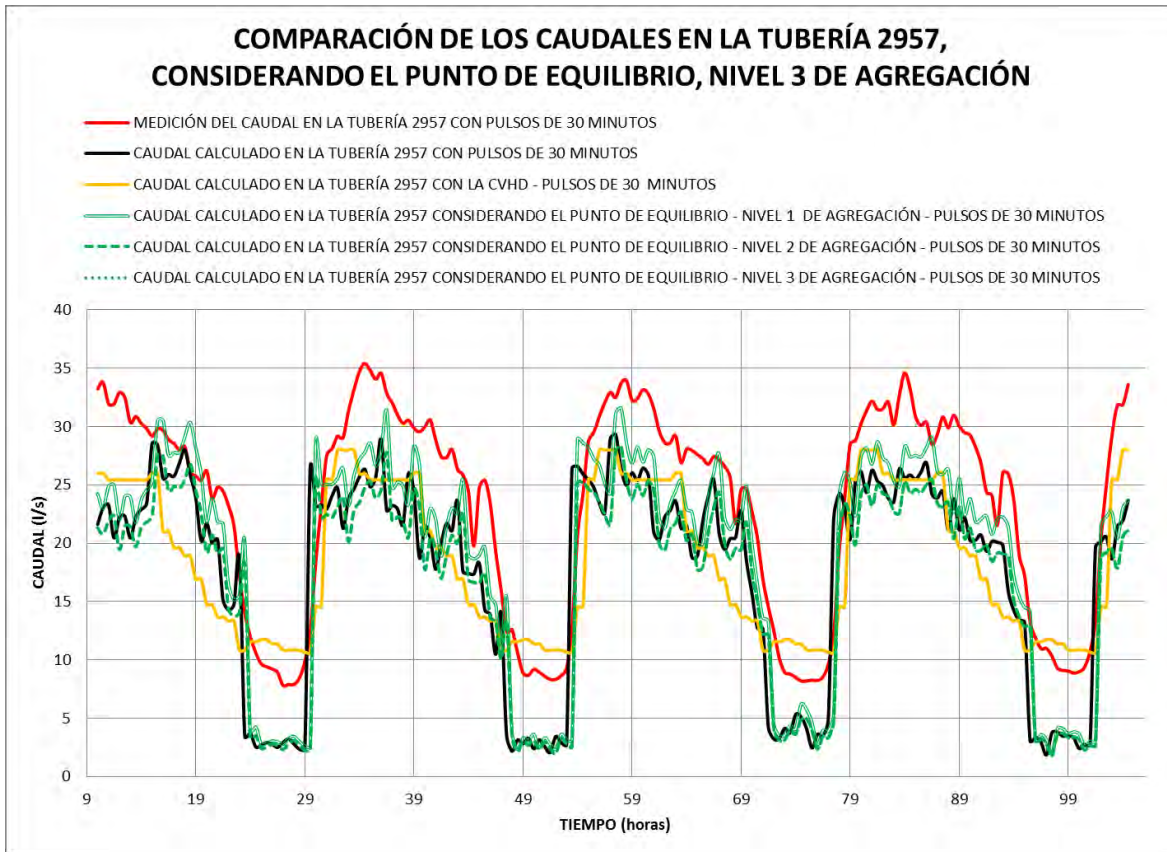
Gráfica 8.17. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 3013 y 832 considerando el punto de equilibrio y nivel 3 de agregación.

El patrón de consumo generado para el nodo 3013 incluye 3100 tomas domiciliarias, mientras que para el nodo 832 son 668 tomas.

8.3.6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL NIVEL TRES DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO EL PUNTO DE EQUILIBRIO

Dado que el nodo 165 se encuentra entre tuberías de 152.4 mm no se evalúa el nivel 3 de agregación (eliminar tuberías igual o menores a 152.4 mm) para este nodo.

La Gráfica 8-18 compara en la tubería 2957 los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD, nivel 1 de agregación, nivel 2 de agregación y el nivel 3 de agregación, considerando el punto de equilibrio.



Gráfica 8-18. Caudal en la tubería 2957 considerando el punto de equilibrio y el nivel 3 de agregación.

El promedio del caudal en el nivel 3 es prácticamente el mismo que el caudal para el nivel 2 de agregación, por lo que la información del nivel de agregación 3 es el mismo que el 2.

En la Gráfica 8-19 se presentan el comportamiento de la presión en el nodo 3013 correspondiente a la tubería 2957.



Gráfica 8-19. Presión en el nodo 3013 considerando el punto de equilibrio y nivel 2 de agregación.

Existe variación en la presión en el nodo 3013 con el nivel 3 de agregación, esto se debe a la disminución del caudal en el nodo, ya que al transportar menos caudal la presión aumenta, sin embargo estas diferencias en la curva de la presión no son importantes.

8.3.7. NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL UNO DE AGREGACIÓN, CONSIDERANDO ZONAS

Considerando la agregación por zona y nivel uno de agregación, se generan 55 nodos de agregación; esto es, 6 nodos más que el realizado en el nivel 1 con punto de equilibrio. En el Anexo digital 2 se muestran los patrones de la demanda introducidos en cada nodo de agregación de la red de abastecimiento. En la Tabla 8-3 se enlistan los nodos involucrados en el nivel 1 de agregación.

Tabla 8-3. Nodos de agregación considerando agregación por zonas en el nivel 1.

ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO
1	24	11	166	21	10198	31	2129	41	423	51	477
2	25	12	126	22	1352	32	1383	42	424	52	530
3	1997	13	167	23	1400	33	1339	43	402	53	1560
4	1998	14	168	24	1475	34	1336	44	465	54	1545
5	1995	15	141	25	1349	35	1331	45	463	55	2221
6	1996	16	186	26	1397	36	1289	46	450		
7	1431	17	1433	27	1392	37	1963	47	493		
8	1432	18	218	28	1697	38	1298	48	498		
9	164	19	3009	29	1394	39	2927	49	509		
10	165	20	1452	30	2239	40	1318	50	502		

El nodo de agregación 165 considerando zonas coincide con la agregación de punto de equilibrio dado que es una zona aislada. Por lo tanto, para el nodo 165 los resultados obtenidos en la agregación por zona es la misma que cuando se considera el punto de equilibrio.

Por otro lado, la Tubería 2957 (segundo punto de control) tiene influencia sobre una red mallada lo que ocasiona resultados diferentes en el momento de la agregación.

La Ilustración 8-8 muestra los nodos incluidos en la agregación de las demandas asignados al nodo 1475.

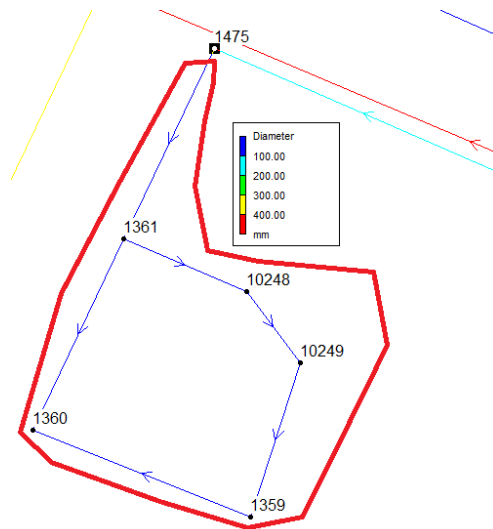
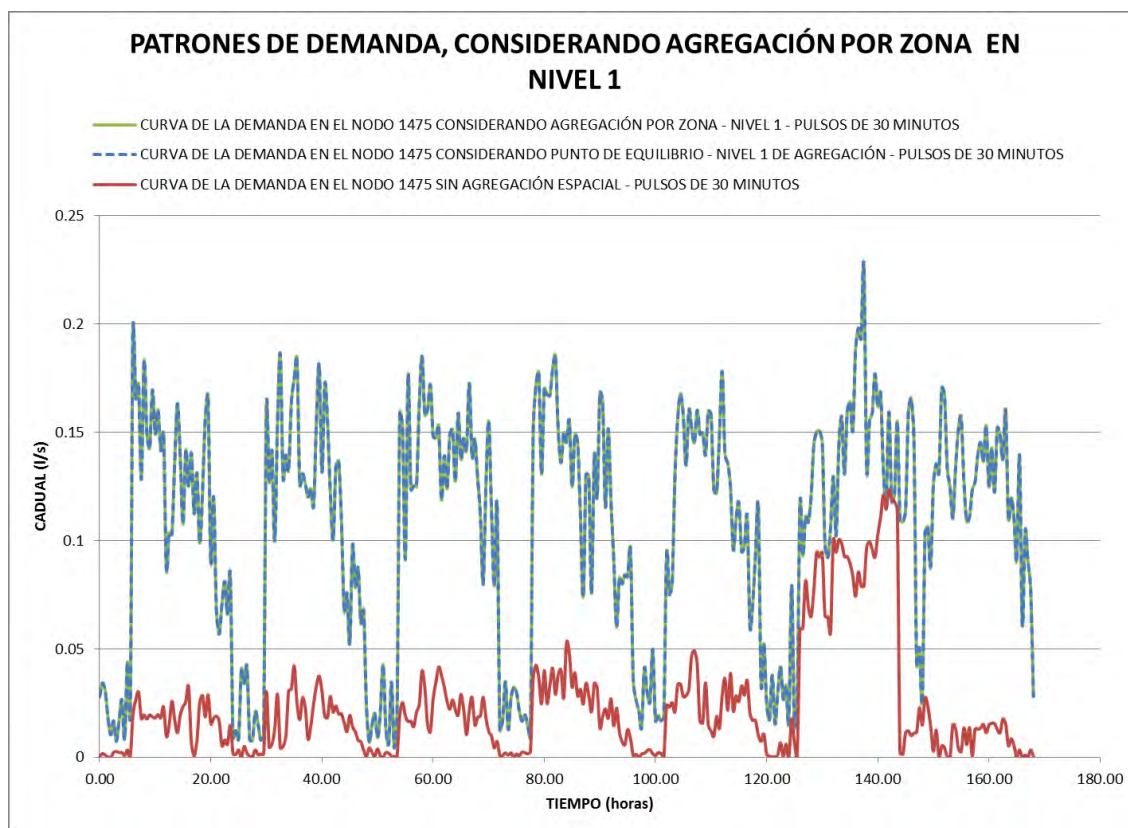


Ilustración 8-8. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1475 considerando agregación por zona y nivel 1.

Los patrones de demanda introducidos en el modelo hidráulico se muestran en la Gráfica 8-20



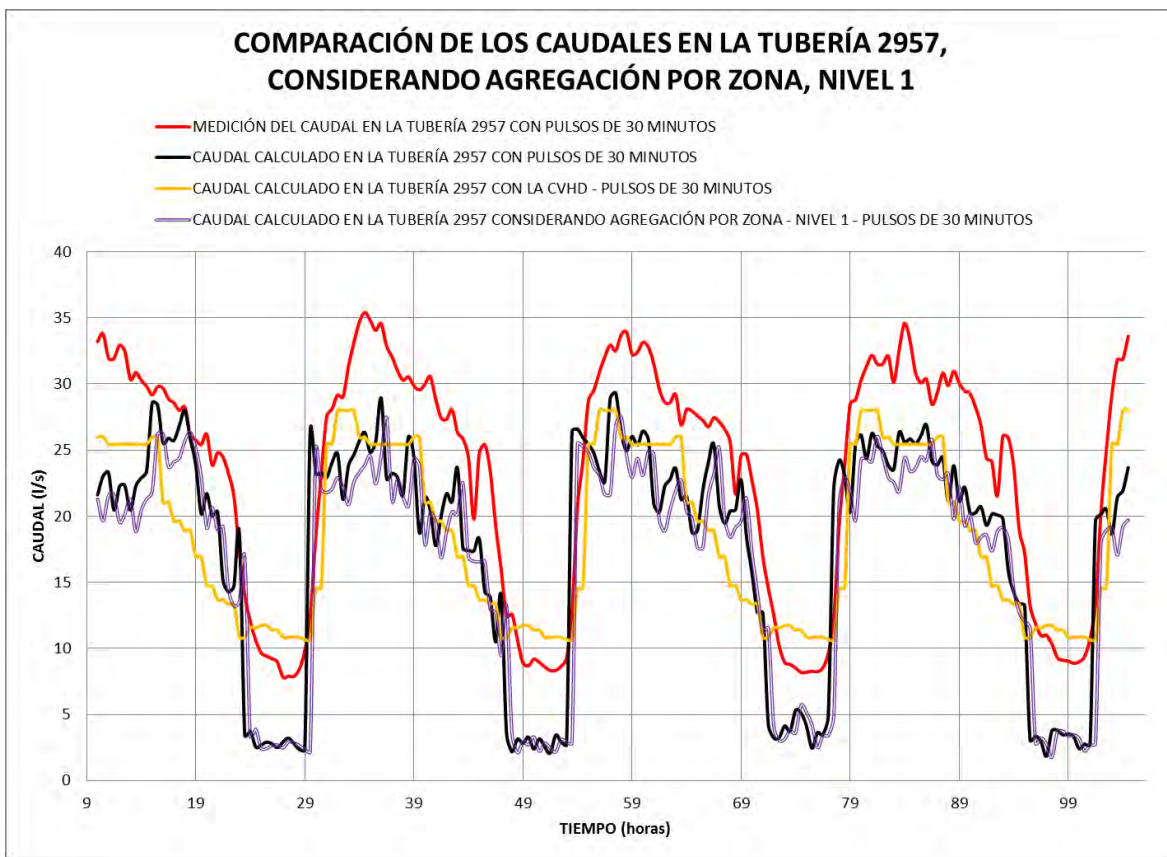
Gráfica 8-20. Patrón de la demanda introducido en el nodo 1475 considerando zonas de agregación en el nivel 1.

El patrón de la demanda generado para el nodo 1475, considerando agregación por zona, da a 24 tomas domiciliarias, este proceso se realizó para los 55 nodos indicados en la Tabla 8-3. Se observa que no hay diferencia en los consumos agregados al nodo 1475 con el punto de equilibrio y por zonas en el nivel uno, esto debido a que la rama que se agrega es aislado.

8.3.8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 1

Debido a que la agregación por zona y con punto de equilibrio para el nodo 165 es idéntica, el resultado es el mismo; por lo tanto solo se presenta los resultados del comportamiento hidráulico en la tubería 2957 y su nodo adyacente 3013.

La Gráfica 8-21. compara en la tubería 2957 los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD y el primer nivel de agregación, considerando la agregación por zona.



Gráfica 8-21. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel 1 de agregación por zona.

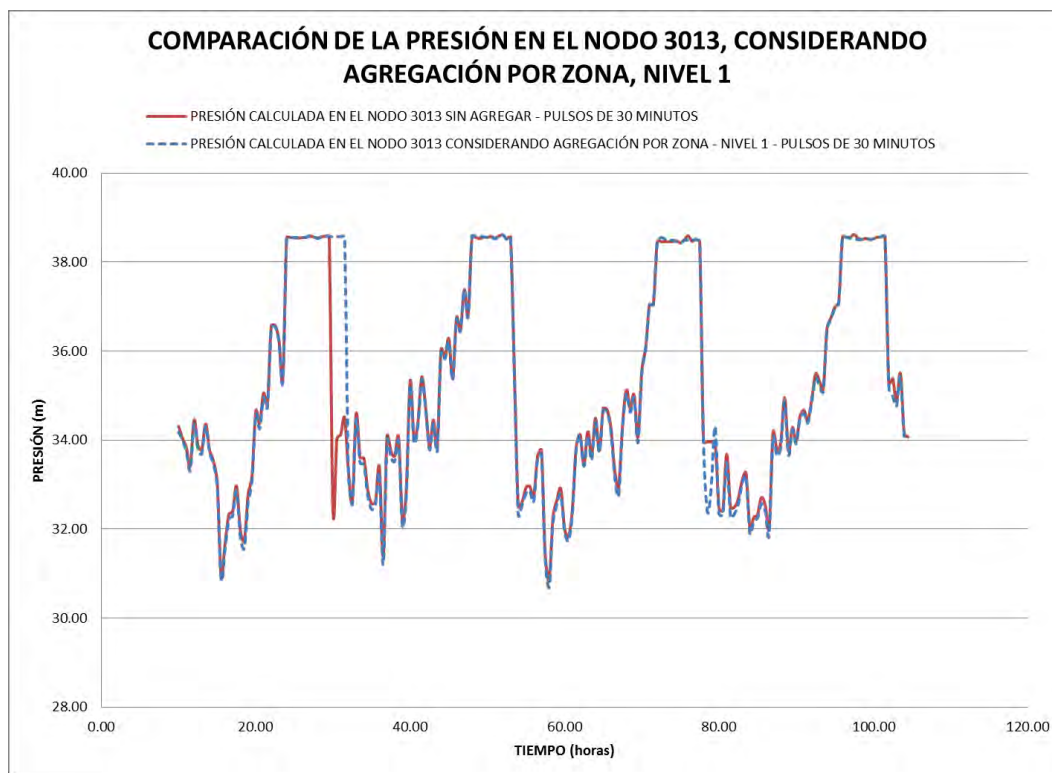
Hay variación en el caudal en el punto de control correspondiente al tramo 2957 (punto de control) antes y después de la agregación, el promedio del caudal antes de la agregación es 17.36 l/s aproximadamente y después de la agregación 16.31 l/s; esta diferencia es de 1.06 l/s y representa 6 % menos caudal que el ocurrido antes de la agregación. Por lo tanto con respecto al

cálculo, preliminarmente este método de agregación en este nivel es mejor para la agregación espacial que considerando el punto de equilibrio.

Por otro lado la diferencia entre la medición y el caudal promedio en el nivel 1 de agregación es de 6.85 l/s, es decir, 30 % menos que lo medido. Por lo tanto con respecto a la medición, preliminarmente el nivel 1 de agregación considerando el punto de equilibrio es mejor que este método para la agregación espacial.

Esta tubería originalmente sirve aproximadamente a 3316 tomas domiciliarias (la red es mallada y diferentes tubería abastecen la misma zona), con el nivel 1 de agregación esta tubería atiende a 3116 tomas domiciliarias, es decir, se desvió el consumo de 200 tomas domiciliarias.

El comportamiento de la presión en el nodo adyacente 3013 se presenta en la Gráfica 8-22.



Gráfica 8-22. Presión en el nodo 3013 considerando nivel 1 de agregación por zona.

La variación de la presión en la Gráfica 8-22, se debe a la disminución del caudal en el nodo, ya que al transportar menos caudal la presión aumenta, sin embargo estas diferencias en la curva de la presión no son importantes.

8.3.9. NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL DOS DE AGREGACIÓN CONSIDERANDO ZONAS

En el nivel 2 de agregación por zona se consideran 20 nodos de agregación, el Anexo digital 2 tiene los patrones de demanda introducidos en cada nodo de agregación de la red de abastecimiento. En la Tabla 8-4. se enlistan los nodos involucrados en la agregación espacial nivel 2 por zonas.

Tabla 8-4. Nodos de agregación empleados en el nivel 2 de agregación, considerando agregación por zona.

ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO	ID	NODO
1	162	6	842	11	1381	16	3035
2	170	7	841	12	2130	17	10271
3	219	8	2001	13	397	18	1486
4	188	9	1356	14	438	19	3029
5	1294	10	1379	15	446	20	1480

La Ilustración 8-9. muestra a manera de ejemplo, los nodos incluidos en la agregación al nodo 1356

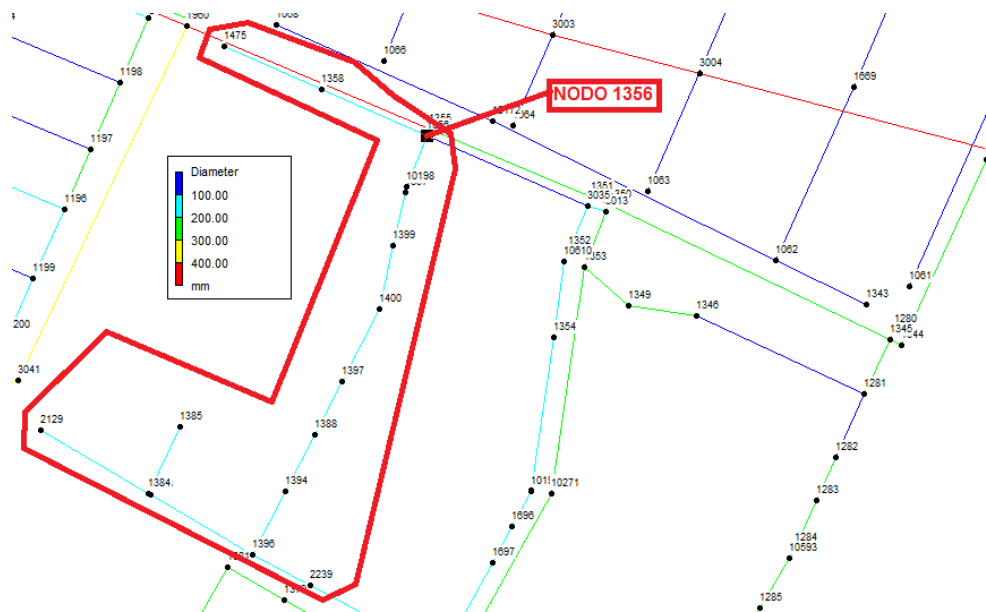
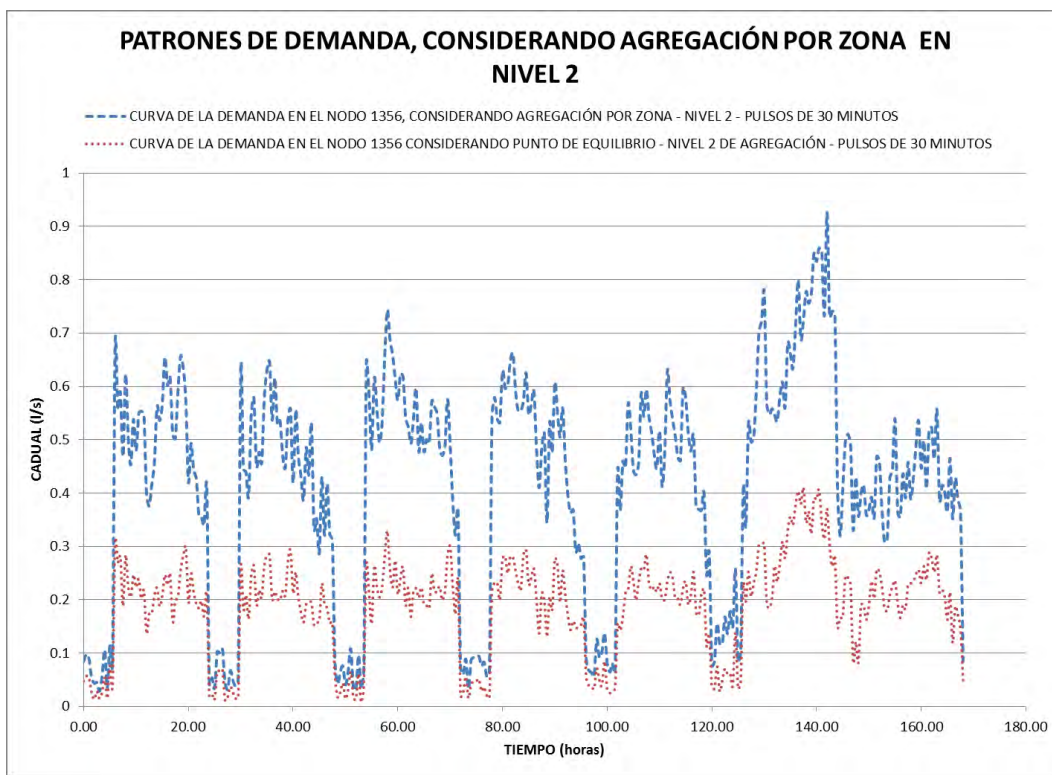


Ilustración 8-9. Nodos cuyo consumo se agrega al nodo 1356, considerando agregación por zona y nivel 2.

De la ilustración anterior se observan que los nodos que se eliminan y cuyos consumos se agregan en el nodo 1356 son: 2129, 1385, 1384, 1396, 1383, 2239, 1394, 1388, 1397, 1400, 1399, 10198, 1357, 1475, 1358, esto ocurre después de la agregación por zona en el nivel 2. Por lo tanto después de la agregación, el nodo 1356 representa el consumo de estos 15 nodos eliminados. Es notable mencionar que el nodo 1356 absorbe en el nivel de agregación al nodo 1475 que fue nodo de agregación en el nivel 1. Además que originalmente el nodo 1356 no tiene ninguna demanda asignada.

El patrón de la demanda introducido en el nodo 1356 del modelo de simulación hidráulica, después de la agregación por zona en el nivel 2 se muestra en la gráfica 8-23.

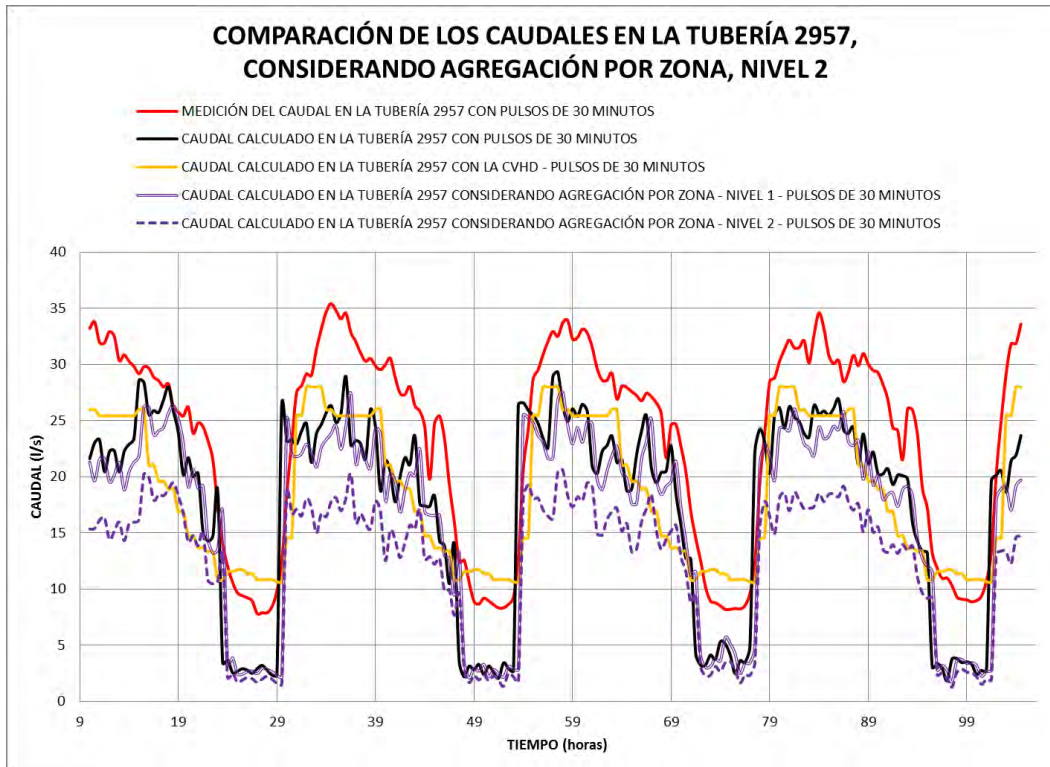


Gráfica 8-23. Patrón de la demanda introducido en el nodos 1356 considerando zonas de agregación en el nivel 2.

El patrón de la demanda generado para el nodo 1356 en la agregación por zona nivel 2, atiende a 80 tomas domiciliarias, por lo que hay una diferencia de 46 tomas entre la agregación nivel 2 por zonas y con punto de equilibrio (34 tomas domiciliarias). Esto denota que el caudal varía según el método de agregación empleado para la simplificación de la red.

8.3.10. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 2

La Gráfica 8-24 muestra en la tubería 2957 (punto de control), la comparación de los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD, el nivel 1 y 2 de agregación, considerando la agregación por zonas.



Gráfica 8.24. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel de agregación 2 por zonas.

El promedio del caudal en la tubería 2957 en el nivel 2 de agregación por zona es 12.24 l/s aproximadamente, este caudal se aleja al caudal promedio antes de simplificar la red (17.36 l/s) y además se aleja más del caudal medido. Esto es importante si se intenta obtener las fugas con el caudal del nivel 2 de agregación, entonces las fugas estimadas serán mayores que las reales, y el error se debe al método de agregación espacial de los consumos.

La diferencia entre el caudal en el nivel 2 de agregación y el caudal antes de simplificar la red es de 5.11 l/s y representa 29.45 % menos. Por otro lado, la diferencia entre la medición y el caudal promedio en el nivel 2 de agregación es de 10.92 l/s, es decir, el 47 % menos que lo medido.

Con el nivel 2 de agregación se desvió el consumo de 976 tomas domiciliarias, esto es 776 tomas menos que con el nivel 1 de agregación.

En la Gráfica 8-25 se presentan el comportamiento de la presión en el nodo 3013 correspondiente a la tubería 2957.



Gráfica 8-25. Presión en el nodo 3013 considerando nivel 2 de agregación por zona.

La presión en el nodo 3013, no varía considerablemente antes y después del nivel 2 de agregación, pero si presenta el aumento de la presión (puntos violetas encima de la curva), esto debido a la disminución del caudal debido a la agregación espacial.

8.3.11. NODOS INVOLUCRADOS EN EL NIVEL 3, CONSIDERANDO ZONAS

Se consideran los nodos 3013 y 832 para la agregación de los patrones de demanda en el nivel 3 por zona, en el Anexo digital 2 se muestran los patrones de demanda introducidos en los nodos.

La Ilustración 8-10. muestra los nodos incluidos en la agregación de los consumos que se asignan a los nodos 3013 y 832.

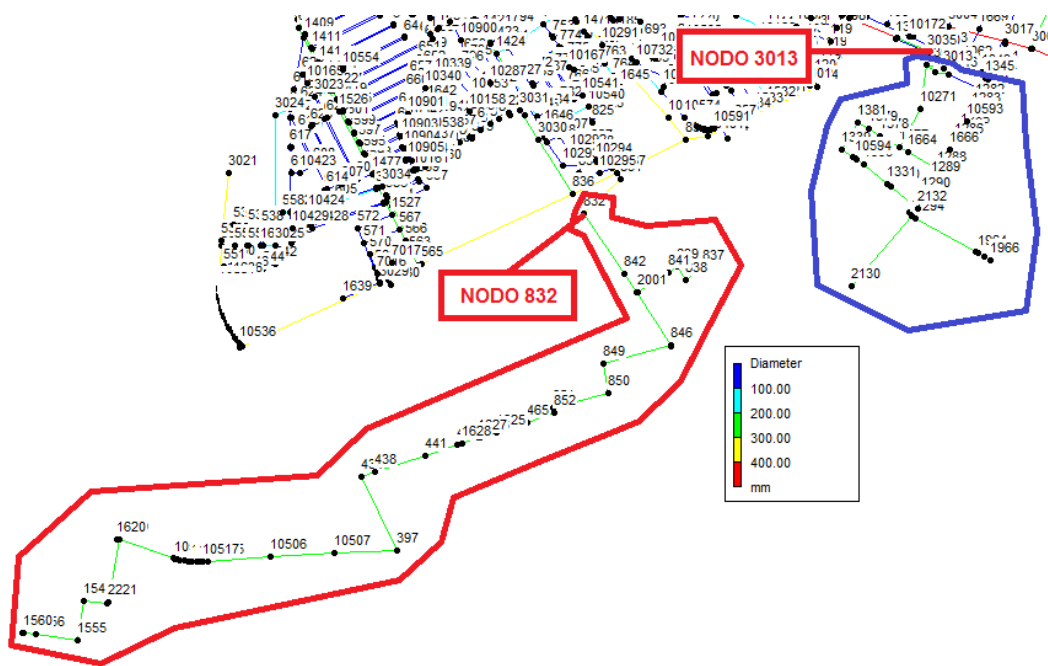
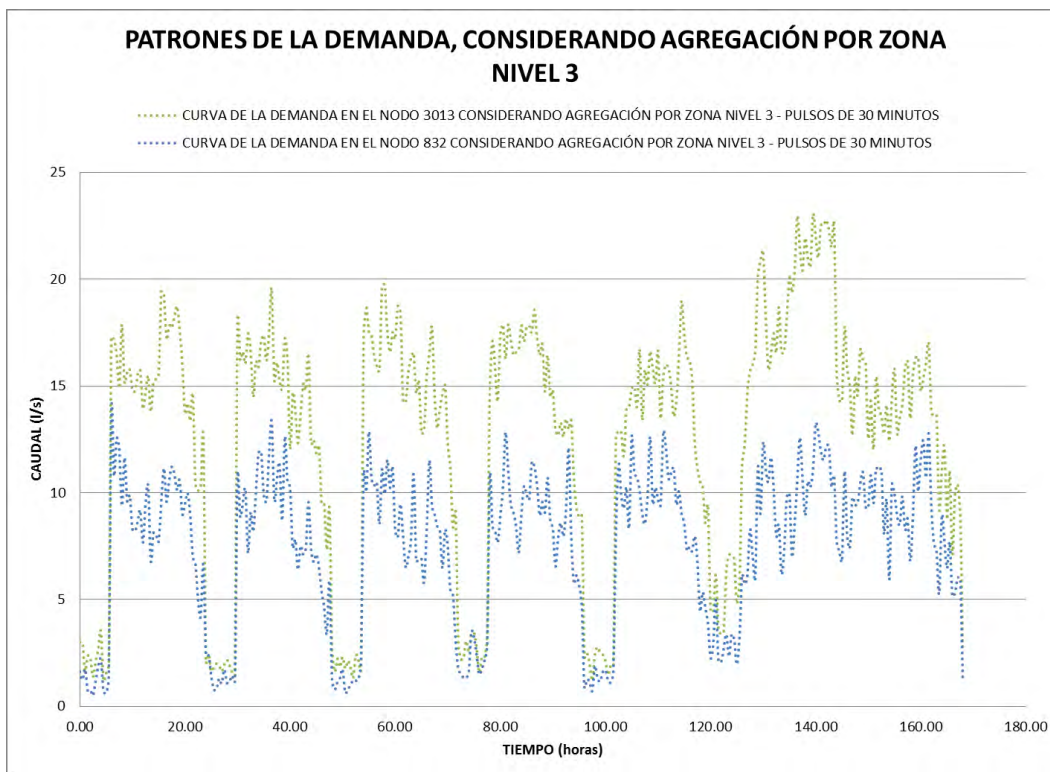


Ilustración 8-10. Nodos cuyo consumo se agrega a los nodos 3013 y 832, considerando nivel tres de agregación por zona.

Los nodos encerrados en azul se agregan al nodo 3013 y los encerrados en rojo al 832, los patrones de demanda introducidos en el modelo hidráulico se muestran en la Gráfica 8-26

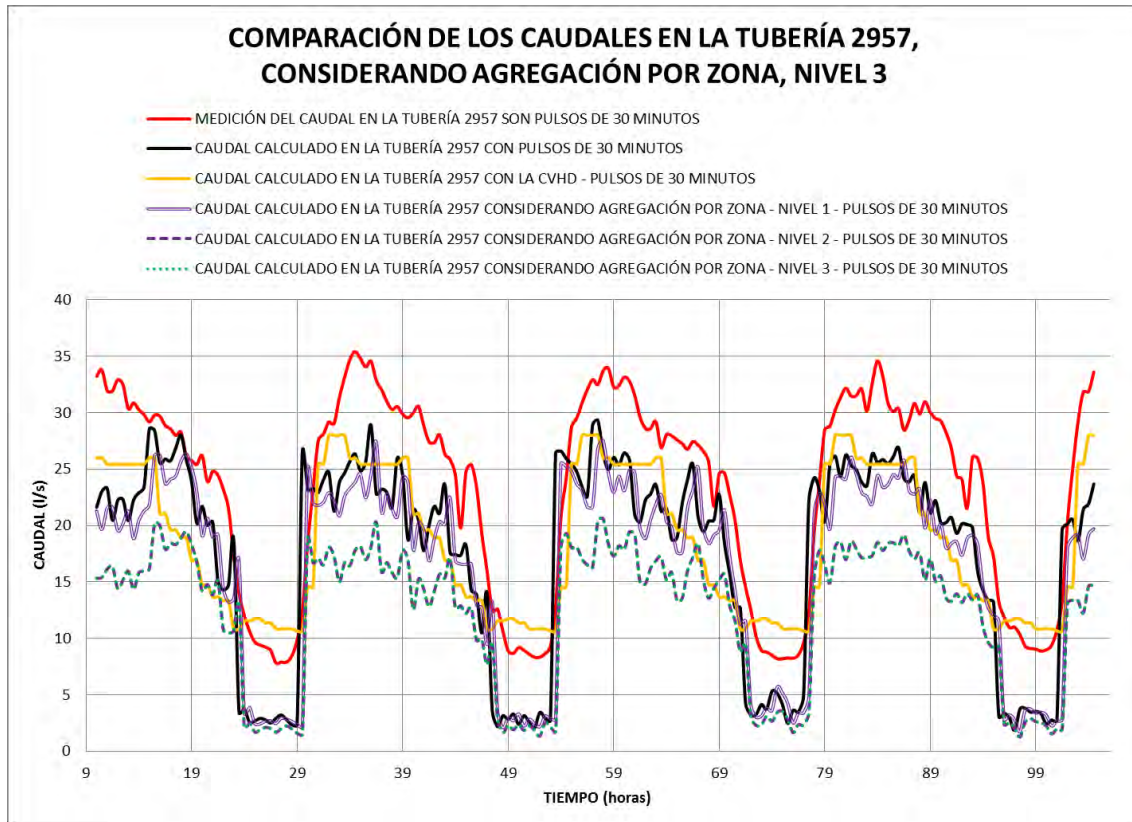


Gráfica 8-26. Patrones de la demanda introducidos en los nodos 3013 y 832 considerando el nivel 3 de agregación por zona.

El patrón de consumo generado para el nodo 3013 incluye 2340 tomas domiciliarias, mientras que para el nodo 832 son 1353 tomas.

8.3.12. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON LA AGREGACIÓN ESPACIAL POR ZONAS NIVEL 3

La Gráfica 8-27 compara en la tubería 2957 (punto de control), los caudales obtenidos de la medición, el empleo de la CVHD, nivel 1 de agregación, nivel 2 de agregación y el nivel 3 de agregación considerando la agregación por zona.

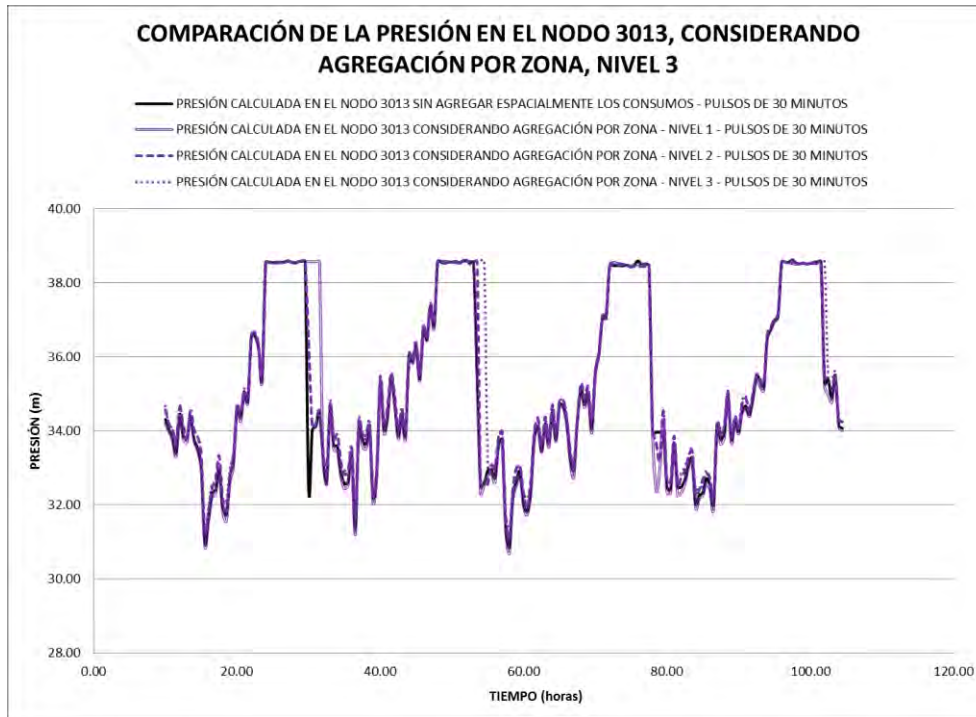


Gráfica 8.27. Caudal en la tubería 2957 considerando nivel de agregación 3 por zonas.

El promedio del caudal en el nivel 3 es prácticamente el mismo para el nivel 2.

Con el nivel 3 de agregación se desvió el consumo de 976 tomas domiciliarias, esto es 776 tomas menos que con el nivel 1 de agregación.

En la Gráfica 8-28. se presentan el comportamiento de la presión en el nodo 3013, nodo adyacente a la tubería 2957.



Gráfica 8-28. Presión en el nodo 3013 considerando nivel 3 de agregación por zona.

De la gráfica anterior se observa que la presión en el nodo 3013 varía según el nivel de agregación (en función de la variación de los caudales, sin embargo ningún cambio es realmente considerable en la práctica.

8.4. CONCLUSIONES PRELIMINARES

Por lo tanto preliminarmente se concluye que la presión no es el parámetro más afectado con la agregación espacial; sin embargo, el caudal si tiene mayor variación dependiendo del método y nivel de agregación. En el siguiente capítulo se analizan los resultados y comparan los diferentes métodos y niveles de agregación, con el fin de obtener recomendaciones para la modelación hidráulica.

Por otro lado se observa que la Curva de la Variación Horaria de la Demanda, no modela ninguno de los estados críticos en la red, y tampoco proporciona información acerca de las fugas; no tiene el mismo comportamiento hidráulico en la red, ya que difiere de la medición. Por lo tanto no se debe esperar que un modelo hidráulico que emplee la CVHD como patrón de la demanda, se aproxime al comportamiento real de la red.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y GENERACIÓN DE RECOMENDACIONES

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y GENERACIÓN DE RECOMENDACIONES

Se analizan los resultados en los puntos de control previamente utilizados; el nodo 165 (168 horas de medición), la tubería 2957 (94.5 horas de medición) y el nodo 3013 (94.5 horas de modelación), ver ubicación en la Ilustración 9-1. Los dos primeros se eligen porque existe la medición de campo en esos puntos, mientras que el tercero sirve de referencia para conocer la presión en la tubería 2957. La importancia de tener datos medidos radica en la capacidad de comparar y por ende, determinar con cuál método de agregación se logra, en la simulación hidráulica, el comportamiento del flujo más apegado a la realidad y que implicaciones existen al emplear los diferentes métodos.



Ilustración 9-1. Ubicación en la red del nodo 165 y la tubería 2957 (Arreguín, Alcocer, 2010).

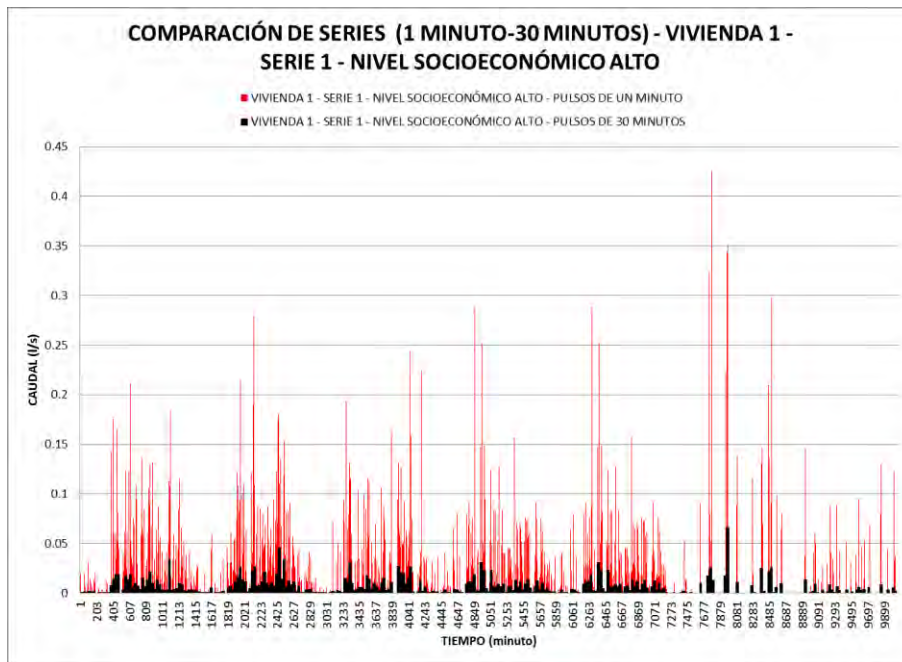
Primero se analiza la agregación temporal (AT), ya que permite emplear las series con los patrones de consumo más adecuados en la red. Luego se analizan las implicaciones de la agregación espacial, por lo tanto en esta etapa se completa el análisis de la agregación espacial y temporal (AET) de la red.

9.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN TEMPORAL

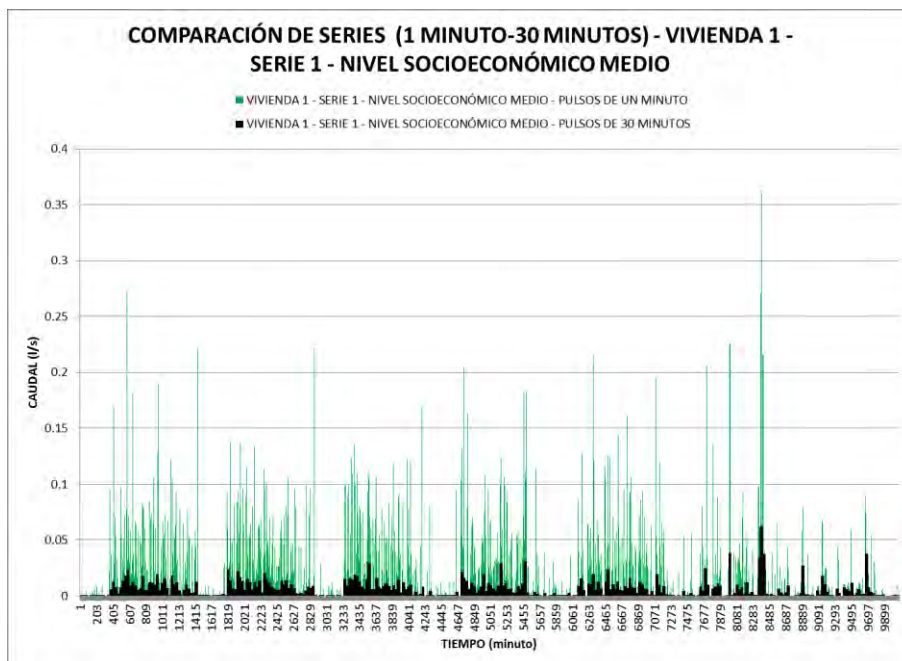
Las series tomadas de la base de datos conservan la masa (caudal promedio del consumo), sin embargo la varianza refleja una modificación (intensidad en los pulsos de consumo); la agregación temporal reduce este error en la varianza, por ende en la desviación estándar (σ).

Se considera que las series agregadas temporalmente (SAT) son adecuadas, cuando en los puntos de control, la diferencia entre la desviación estándar del caudal en la medición y la modelación, es menor al 5 % del promedio del caudal calculado (tolerancia elegida por el modelador).

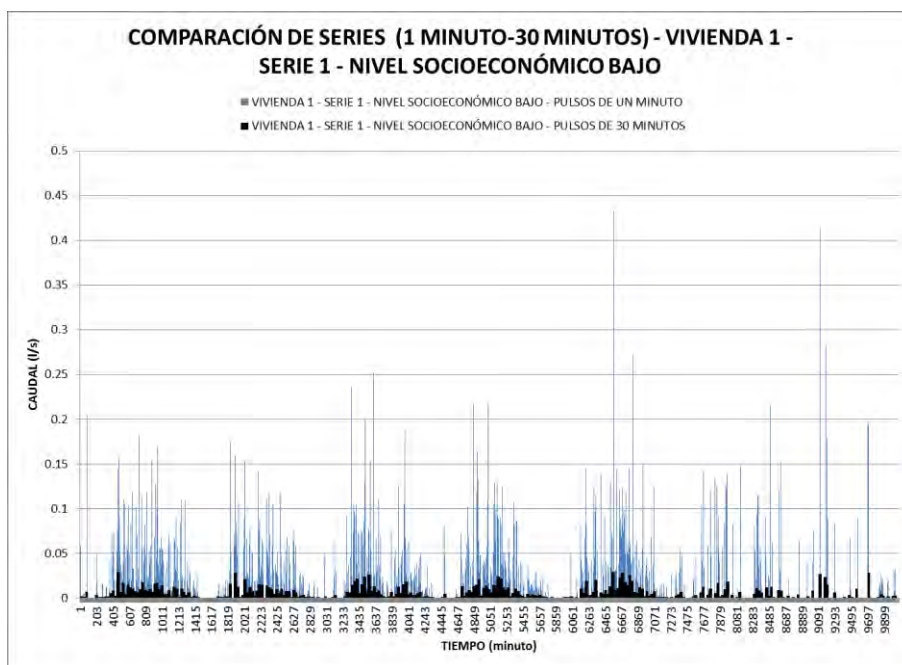
La corrección en la desviación estándar se muestra físicamente con la disminución en la intensidad de los pulsos máximos y el aumento en los mínimos. En las gráficas 9-1, 9-2 y 9-3. se muestran estos cambios en las series sintéticas generadas con el esquema estocástico (serie con pulsos de un minuto) cuando se aplican la agregación temporal con pulsos de 30 minutos de duración.



Gráfica 9-1. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico alto.



Gráfica 9-2. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico medio.



Gráfica 9-3. Comparación de la agregación temporal en la vivienda1-serie1-nivel socioeconómico bajo.

La atenuación de las intensidades en el consumo toma importancia cuando se introduce la demanda en los nodos de la red, ya que mayores intensidades ocasionan mayores pérdidas de energía en la red, provocando una afectación en los resultados obtenidos a través del modelo de simulación hidráulica.

Por ejemplo, la Tabla 9-1. muestra la atenuación del pulso de máxima intensidad, para la primera serie de cada casa-habitación con distinto nivel socioeconómico. Cuando las series estocásticas generadas ($\Delta t=1$ min) se ensamblan en series agregadas temporalmente con pulsos de 30 minutos de duración (SAT30). La intensidad de los pulsos con $\Delta t=1$ min se reducen en promedio entre 82 y 94 % aproximadamente.

Tabla 9-1. Porcentaje del caudal reducido en los picos con la agregación temporal.

ID	Intensidad del pulso máximo - $\Delta t=1$ min (l/s)	Intensidad del pulso máximo - $\Delta t=30$ min (l/s)	Diferencia entre el pulso de máxima intensidad con $\Delta t=1$ min y $\Delta t=30$ min (l/s)	Disminución de la máxima intensidad (%)
Vivienda 1-Serie 1- Nivel Socioeconómico Alto	0.42	0.067	0.35	84.05
Vivienda 1-Serie 1- Nivel Socioeconómico Medio	0.352	0.062	0.29	82.39
Vivienda 1-Serie 1- Nivel Socioeconómico Bajo	0.425	0.028	0.40	93.41

Estos pulsos máximos de un minuto de duración pueden ocasionar pérdidas importantes en la red, por ejemplo, el comportamiento hidráulico difiere cuando por una tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada pasa 1 l/s que cuando transporta 0.1 l/s. En el primer caso, vale la pena mencionar que se presenta un orden de magnitud mayor de pérdidas debidas al esfuerzo cortante (pérdidas por fricción).

Hay que recordar que las pérdidas están directamente relacionadas con la velocidad del flujo, por ende el caudal. Las pérdidas aumentan o disminuyen en proporción cuadrática, ver ecuación 9-1.

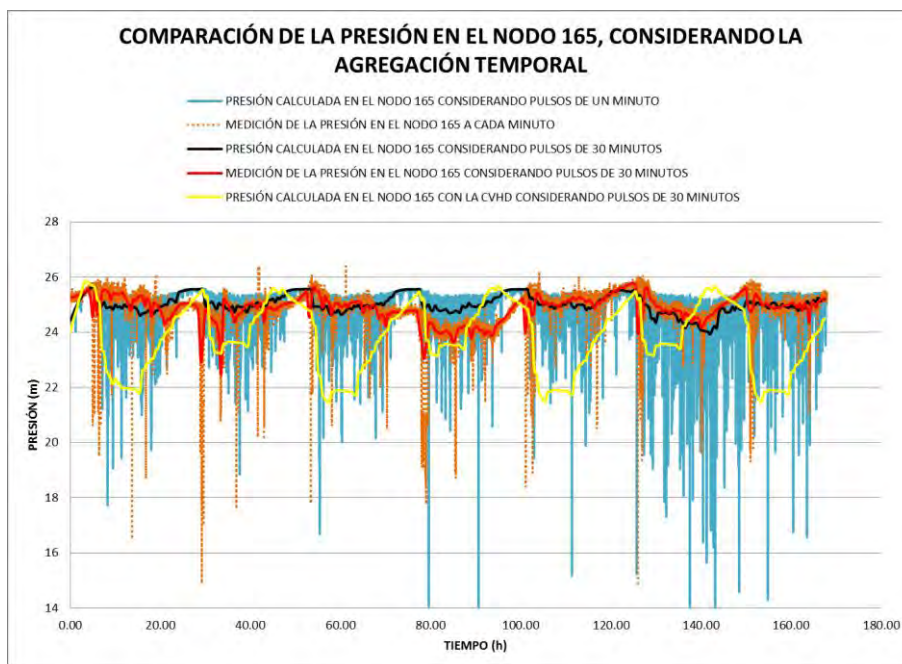
$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \Rightarrow h_f = f \frac{L Q^2}{D 2gA^2} \quad 9-1$$

donde: h_f es la pérdida de carga debida a la fricción; f , el factor de fricción de Darcy; L , la longitud de la tubería; D , el diámetro de la tubería; v , la velocidad media del fluido; g , la aceleración de la gravedad: $g = 9.81$ m/s; Q , el caudal y A es el área transversal de la tubería.

Con base en lo anterior, se emplea dentro del modelo de simulación hidráulica, las series agregadas temporalmente con pulsos de 30 minutos de duración (SAT30).

Por otro lado, usar las SAT30, mejora los resultados que se obtuvieron en los puntos de control (mediciones en campo) del modelo de simulación hidráulica, en comparación que cuando se emplea la CVHD y las series estocásticas con pulsos de un minuto de duración.

La Gráfica 9-4 compara la presión calculada en el nodo 165 (punto de control) considerando, las series sintéticas con pulsos de un minuto, la SAT30, la medición a cada minuto, la medición con pulsos de 30 minutos y los cálculos con la CVHD con pulsos de 30 minutos.



Gráfica 9-4. Comparación de las presiones en el nodo 165 considerando la agregación temporal.

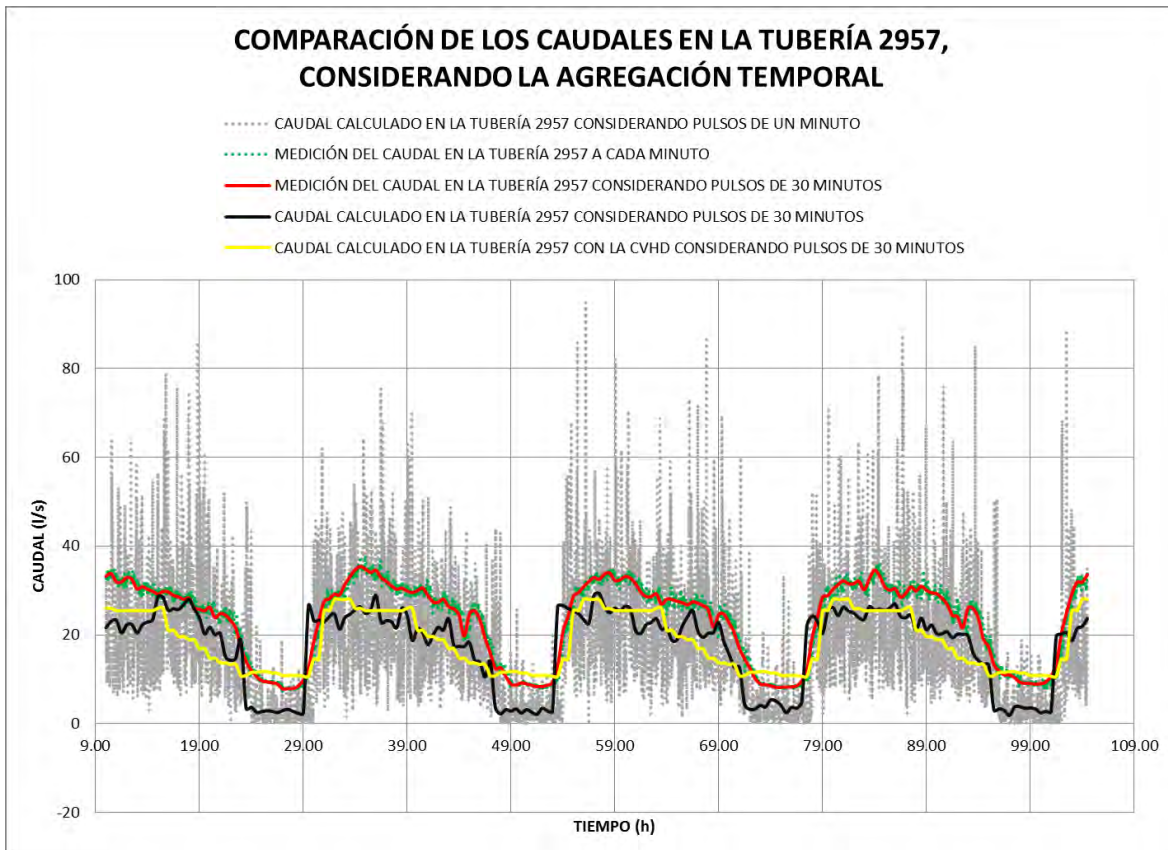
La desviación estándar denota el grado de atenuación, no solo de los pulsos con intensidades con un orden de magnitud elevado, sino para todos los datos. La Tabla 9-2 presenta la desviación estándar de la presión en el nodo 165, y considera los diferentes casos evaluados para el análisis de la agregación temporal del consumo.

La presión calculada a través de la CVHD, presenta la mayor desviación estándar (1.27 m), teniendo una diferencia de 0.80 m con respecto a la medición con pulsos de 30 minutos. Empleando las SAT30 ($\sigma=0.339$ m) se logra una curva con mayor apego a la medición ($\sigma=0.477$ m), por ende para calcular la presión es mejor emplear las SAT30 que la CVHD.

Tabla 9-2. Comparación en la desviación estándar con datos obtenidos de la presión en el nodo 165.

CURVA DE LA PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (m)
MEDICIÓN DE LA PRESIÓN EN EL NODO 165 A CADA MINUTO	0.748
MEDICIÓN DE LA PRESIÓN EN EL NODO 165 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS	0.477
PRESIÓN CALCULADA EN EL NODO 165 CONSIDERANDO PULSOS DE UN MINUTO	0.952
PRESIÓN CALCULADA EN EL NODO 165 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS	0.339
PRESIÓN CALCULADA EN EL NODO 165 CONSIDERANDO LA CVHD CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS	1.273

En el segundo punto de control el tramo (tubería) 2957 se mide el caudal. La atenuación de los pulsos de máxima intensidad (caudal) debida a la aplicación de las SAT30, es más evidente comparado con la presión. La Gráfica 9-5 compara el caudal calculado en el tramo 2957, empleando las series estocásticas ($\Delta t=1\text{min}$), las SAT30, la CVHD con pulsos de 30 minutos la medición a cada minuto y la medición con pulsos de 30 minutos.



Gráfica 9-5. Comparación de los caudales en el link 2957 considerando la agregación temporal.

Se observa de la Gráfica 9-5, que la serie estocástica con pulsos de un minuto llega a intensidades de 90 l/s, mientras que la intensidad máxima en la medición llega solo a 40 l/s. Además los resultados con la CVHD nunca modelan las condiciones críticas en la red, es decir la amplitud de la curva de la medición es mayor. Sin embargo, cuando se aplican las SAT30 se tiene un comportamiento hidráulico con mayor apego a la realidad (medición), pero con un déficit de caudal promedio de 25 %. Esto se debe a que las SAT30, solamente representa el consumo proveniente de la casa-habitación, mientras que la medición en el tramo 2957 considera el consumo y fugas en el sector.

Como ya se explicó anteriormente, la diferencia entre la series estocásticas ($\Delta t = 1$ min) y las SAT30, se deben a que la serie sintética con pulsos de un minuto matemáticamente conservan la masa (promedio del caudal), pero no tiene la misma varianza (intensidad del caudal); con la agregación temporal propuesta, pulsos de 30 minutos, se corrige el problema de la desviación estándar (varianza), es decir se minimiza la dispersión de datos, logrando así mejores resultados en la simulación hidráulica (Moreno, 2009).

La Tabla 9-3 presenta la desviación estándar del caudal en el tramo 2957 (punto de control), y considera los diferentes casos evaluados para el análisis de la agregación temporal del consumo.

La curva del caudal calculada con las series estocásticas presenta la mayor desviación estándar (15.139 l/s) y diferencia (6.20 l/s) con respecto a la medición ($\sigma = 8.96$ l/s). Mientras que al emplear las SAT30, se logra una curva con mayor apego a la medición ($\sigma = 8.90$ l/s), por ende, se recomienda emplear las SAT30 dentro de la modelación hidráulica en lo que a caudal se refiere. La curva del caudal en el tramo 2957 obtenido con la CVHD, tiene una desviación estándar de 6.44 l/s y difiere 2.4 l/s con respecto a la medición. En resumen, aplicar las SAT30, resulta mejor opción que la aplicación de series para intentar representar el caudal dentro de una red de distribución.

Tabla 9-3. Comparación en la desviación estándar con datos obtenidos del caudal en la tubería 2957.

CURVA DEL CAUDAL	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (l/s)
MEDICIÓN DEL CAUDAL EN LA TUBERÍA 2957 A CADA MINUTO	8.988
MEDICIÓN DEL CAUDAL EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS	8.960
CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE UN MINUTO	15.139
CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS	8.902
CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO CVHD - $\Delta t = 30$ MINUTOS	6.448

La diferencia entre la desviación estándar de la medición y las series estocásticas ($\Delta t = 1$ min), representa el 35 % del caudal promedio calculado con las series estocásticas. Aplicando la CVHD la

diferencia representa el 14% y con las SAT30 el 1%. Esto demuestra que las SAT30 corrigen la falta de correlación de la desviación estándar (varianza) entre la medición y las series sintéticas, logrando así la conservación de masa e intensidad en los pulsos del caudal.

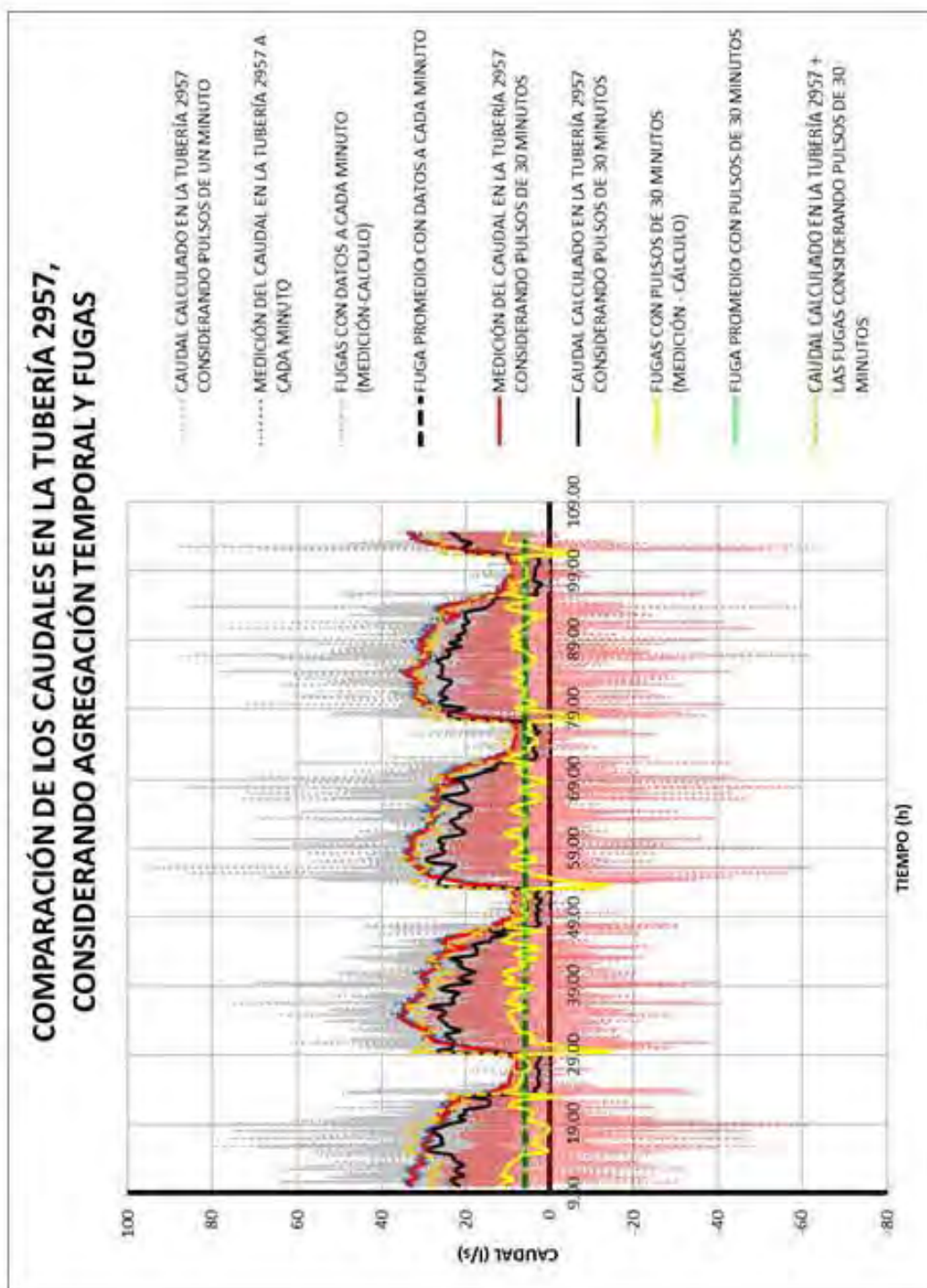
Por otro lado el empleo de las SAT30 dentro del modelo de simulación hidráulica, permite visualizar claramente la ocurrencia de las fugas en el sector de estudio, ya que evita los cambios súbitos de un minuto a otro y presenta mayor continuidad del caudal, ver Gráfica 9-6.

De la Gráfica 9-6. se observa que la fuga promedio de las series estocásticas ($\Delta t=1$ min) y las SAT30 son iguales (línea verde y la línea negra punteada), debido a la conservación de masa en el proceso de agregación temporal; la fuga promedio es de 5.81 l/s (25% del caudal suministrado). Sin embargo, el variante comportamiento del caudal a cada minuto, mostrado con las series estocásticas (línea punteada rosa), no permite ser concluyente en la determinación del momento cuando ocurre la fuga, caso contrario ocurre cuando se emplean las SAT30 (línea negra), ya que presenta por lapsos más grandes (30 minutos) los momentos de mayor o menor caudal.

Cuando se suma el promedio de la fuga en el sector con la curva de caudal empleando las SAT30, se observa un mayor apego del comportamiento del caudal con la medición.

Este análisis de las fugas no se puede realizar cuando se emplea la CVHD, ya que combina los consumos casa-habitación del sector, con las propias pérdidas.

Con base en lo anterior, se determina que es mejor emplear las SAT30 dentro del modelo de simulación que la CVHD y las series estocásticas ($\Delta t=1$ min).



Gráfica 9-6. Comportamiento de las fugas dependiendo del tiempo de duración de los pulsos.

9.2. RECOMENDACIONES SOBRE LA AGREGACIÓN TEMPORAL

1. Se recomienda emplear la agregación temporal para prescindir de los efectos de la elasticidad del agua en la modelación hidráulica.
2. Emplear la agregación temporal para corregir los problemas en la desviación estándar (función de la varianza) de las series sintéticas ($\Delta t = 1$ min), y así obtener resultados con mayor apego a la realidad.
3. Emplear la agregación temporal, para obtener curvas que permitan determinar no sólo las fugas presentes en el sector analizado, sino también el momento de ocurrencia.
4. Utilizar el tiempo de 30 minutos propuesto por Moreno en el 2009, en las series obtenidas bajo el esquema estocástico de NSRPM con pulsos de un minuto de duración (Alcocer, 2007 y Hernández, 2009).
5. Emplear las series agregadas temporalmente con pulsos de 30 minutos de duración (SAT30), dentro del modelo de simulación hidráulica antes de agregar espacialmente la red (esqueletizar o simplificar la red).
6. Considerar las carencias y deficiencias en el modelo hidráulico al emplear la CVHD, ya que no representa completamente el comportamiento hidráulico de la red, sólo el promedio del caudal a través del tiempo a grosso modo, es decir, no modela las situaciones realmente críticas en la red., además no permite calcular las fugas en el sector de estudio.
7. Obtener series estocásticas de la CVHD, empleando el método propuesto por Alcocer (2007), Hernández (2009) y Moreno (2009), para redes de distribución de agua potable en donde no se cuenta con las mediciones necesarias.

9.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL

La agregación por zona es el método más empleado por la mayoría de los “modeladores” o encargados de los modelos de simulación, en los organismos operadores, universidades, empresas de consultoría, etc. Sin embargo, no se conocen las consecuencias reales de emplear este método, por esta razón se considera y estudia la agregación por zona.

Se propone la agregación empleando el punto de equilibrio, ya que respeta el camino más probable del flujo, y por ende el orden de magnitud de los caudales que transportan los tramos de tubería.

La dimensión de la red empleada (diámetro y extensión de las tuberías) y la ubicación de los puntos de control, permiten realizar tres niveles de agregación, por lo tanto para el estudio de la

agregación espacial se realizan 6 cálculos por punto de control. Las series empleadas tienen pulsos de 30 minutos de duración, tal como se recomienda en la sección anterior.

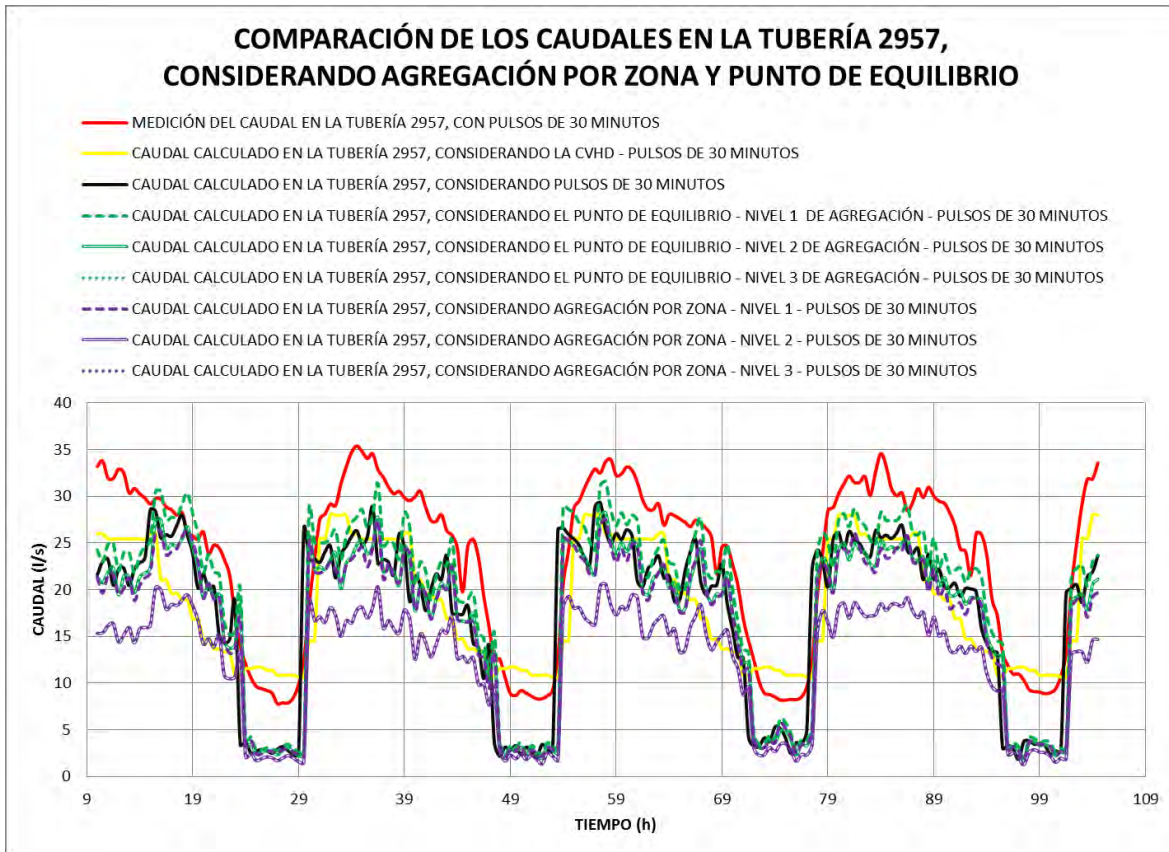
A continuación se indican los cálculos realizados para el análisis de la agregación espacial en la tubería 2957 (punto de control):

1. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando punto de equilibrio - nivel 1 de agregación
2. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando punto de equilibrio - nivel 2 de agregación
3. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando punto de equilibrio - nivel 3 de agregación
4. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando agregación por zona - nivel 1
5. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando agregación por zona - nivel 2
6. Caudal calculado en la tubería 2957, considerando agregación por zona - nivel 3

Al simplificar la red se altera el comportamiento hidráulico en las tuberías principales y secundarias, uno de los factores que influyen es el método de agregación de las demandas, normalmente relacionada con el método de esqueletización de la red.

La comparación del caudal medido y calculado en la tubería 2957 (punto de control), con diferentes métodos y niveles de agregación, se muestra en la Gráfica 9-7.

El patrón de la demanda (forma de la curva) no varía considerablemente a través del tiempo, no así el caudal promedio. Hay que recordar que el caudal calculado empleando las SAT30 es menor en un 25 % con respecto al caudal medido, debido a las fugas del sector.



Gráfica 9-7. Comparación de los caudales en la tubería 2957, considerando agregación por zona y punto de equilibrio.

Con el método de punto de equilibrio se obtienen caudales que varían dentro de un rango aceptable, independientemente del nivel de agregación (condición deseada); mientras que el método de agregación por zonas el caudal oscila dependiendo del nivel de agregación, provocando mayor incertidumbre; esta condición no se desea porque no hay control real en la asignación de los patrones de la demanda o consumo en la red simplificada.

La Tabla 9-4. muestra el promedio de los caudales medidos y calculados en el tramo 2957, considerando agregación con punto de equilibrio y por zona, en tres niveles (nivel 1 simplifica las tuberías igual o menores a 76.2 mm, nivel 2 simplifica las tuberías igual o menores a 152.4 mm y el nivel 3 simplifica las tuberías igual o menores a 254 mm).

Tabla 9-4. Comparación del caudal promedio medido y calculado en la tubería 2957 en la simplificación de la red.

PROMEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAUDAL EN LA TUBERÍA 2957 (PRODUCIDO)	23.17 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO, SAT30)	17.36 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	18.72 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	16.60 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	16.60 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO AGREGACIÓN POR ZONA - NIVEL 1 - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	16.31 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO AGREGACIÓN POR ZONA - NIVEL 2 - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	12.24 l/s
PROMEDIO DEL CAUDAL CALCULADO EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO AGREGACIÓN POR ZONA - NIVEL 3 - PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMIDO)	12.24 l/s
TOMAS ATENDIDAS POR LA TUBERÍA 2957	3316
PORCENTAJE DE FUGAS (PRODUCIDO VS CONSUMIDO, SAT30)	25.09%

Después de realizar la agregación por zona en el nivel 2 y 3, el caudal promedio calculado en el tramo 2957, es de 12.24 l/s en ambos, esto representa 29 % menos del caudal promedio calculado con las SAT30 previo a la AET y 47 % menos del medido. Esta diferencia de caudal es importante, por ende, el método de agregación por zona es inadecuado para esos niveles de agregación.

Por otro lado, los caudales obtenidos de la agregación por zona en el nivel 1 y la agregación considerando punto de equilibrio en los tres niveles, tienen una diferencia menor al 8% con respecto al obtenido con las SAT30 previo a la AET y menor al 30 % con respecto a la medición.

El caudal en la tubería 2957 varía según el método y el nivel de agregación espacial, es decir, hay una redistribución de los caudales. Por lo anterior, se debe emplear el método de agregación espacial que afecte lo menos posible el caudal o la presión de la red completa.

La diferencia de estos caudales, con respecto a la medición y los cálculos antes de la simplificación se muestra en la Tabla 9-5.

Tabla 9-5. Desviación del caudal en la tubería 2957, debido al método y nivel de simplificación.

REFERENCIADO CON LA MEDICIÓN EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS (PRODUCCIÓN)		REFERENCIADO CON EL CÁLCULO DE CAUDAL EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS (CONSUMO)		TOMAS DESVIADAS
MÉTODO Y NIVEL DE AGREGACIÓN	DIFERENCIA PROVOCADA (CAUDAL PROMEDIO DESVIADO)	MÉTODO Y NIVEL DE AGREGACIÓN	ERROR PROVOCADO (CAUDAL PROMEDIO DESVIADO)	
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-4.45 l/s	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	+ 1.36 l/s	+ 260
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-19.21 %	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	+ 7.84 %	
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-6.57 l/s	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	- 0.76 l/s	-145
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-28.36 %	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-4.38 %	
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-6.57 l/s	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	- 0.76 l/s	-145
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-28.36 %	PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-4.38 %	
POR ZONA - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-6.86 l/s	POR ZONA - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	- 1.05 l/s	-201
POR ZONA - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-29.61 %	POR ZONA - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-6.05 %	
POR ZONA - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-10.92 l/s	POR ZONA - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	- 5.11 l/s	-976
POR ZONA - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-47.14 %	POR ZONA - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-29.44 %	
POR ZONA - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-10.92 l/s	POR ZONA - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	- 5.11 l/s	-976
POR ZONA - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-47.14 %	POR ZONA - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-29.44 %	
Tiempo de medición = 94.5 horas				

En la tabla anterior, el signo “+” denota un incremento del caudal en la tubería 2957 al realizar la agregación espacial y el signo “-” indica un decremento. El caudal desviado llega a ser significativo, por ejemplo para la simplificación por zona en el nivel 2 y 3 se desvía el caudal de 976 tomas domiciliarias (29 %) con respecto a las servidas inicialmente (3316 tomas domiciliarias). Por lo tanto, la red simplificada no representa el comportamiento hidráulico de la red completa. Se debe elegir el método que afecte menos el caudal inicial en la red; el volumen desviado también indica la magnitud de la redistribución de caudal debido a la agregación espacial, ver Tabla 9-6.

Tabla 9-6. Volúmenes desviados en la tubería 2957 debido a la agregación temporal.

REFERENCIADO CON LA MEDICIÓN EN LA TUBERÍA 2957 CONSIDERANDO PULSOS DE 30 MINUTOS (PRODUCCIÓN)			
MÉTODO Y NIVEL DE AGREGACIÓN	VOLUMEN DESVIADO (l)	VOLUMEN DESVIADO (m ³)	TOMAS DESVIADAS
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	462672	462.672	+ 260
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-258552	-258.552	-145
PUNTO DE EQUILIBRIO - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-258552	-258.552	-145
POR ZONA - NIVEL 1 DE AGREGACIÓN	-357210	-357.210	-201
POR ZONA - NIVEL 2 DE AGREGACIÓN	-1738422	-1738.422	-976
POR ZONA - NIVEL 3 DE AGREGACIÓN	-1738422	-1738.422	-976
Tiempo de medición = 94.5 horas			

La agregación espacial considerando el punto de equilibrio es el método que menos volumen de agua desvía en 4 días. Por otro lado ninguno de los métodos modela una red simplificada con el mismo comportamiento hidráulico de la red completa.

Con base en lo anterior, es mejor emplear el método de agregación espacial que considera el punto de equilibrio, debido a que considera indirectamente el consumo de los usuarios y respeta el camino más probable del flujo, y además del orden de magnitud de los caudales que transportan los tramos de tubería.

Cuando se realiza la simplificación de la red y la agregación de la demanda, se debe entender el método empleado y la incertidumbre que éste produce en los resultados de la modelación hidráulica. Ya que los resultados obtenidos de una red simplificada son una aproximación del comportamiento hidráulico de la red completa, más no el comportamiento real.

La diferencia de los caudales entre una red simplificada y una completa, se debe a lo complejo de asignar proporcionalmente las demandas en los nodos de agregación (donde se asignan los consumos de los nodos eliminados), particularmente en redes malladas.

A manera de ejemplo, la ilustración 9-2. presenta la redistribución del caudal al dividir una red tipo, para agregar las demandas y usarlas en los nodos de agregación al simplificar la red.

Se observa que los caudales en los tramos homólogos son diferentes (excepto el tramo 1 de suministro). Para explicar porque ocurre esto, se estudia el nodo 5 (dentro del círculo negro). En el “Esquema sin Agregación Espacial” el caudal que satisface la demanda del nodo 5, se divide entre los tramos 13 y 14, sin embargo, en el “Esquema Dividido para Agregar las Demandas”, el tramo 13 es el único que suministra la demanda del nodo 5, por lo tanto, tiene que transportar un mayor caudal, mientras que el tramo 14 deja de transportar el caudal que antes proporcionaba. De esta forma se redistribuye el caudal cuando se simplifica la red.

Realizar el análisis numérico para un nodo es simple, sin embargo, hacerlo para miles de nodos resulta complejo sobre todo en redes malladas (tramos diferentes comparten el suministro de uno o varios nodos agrupados).

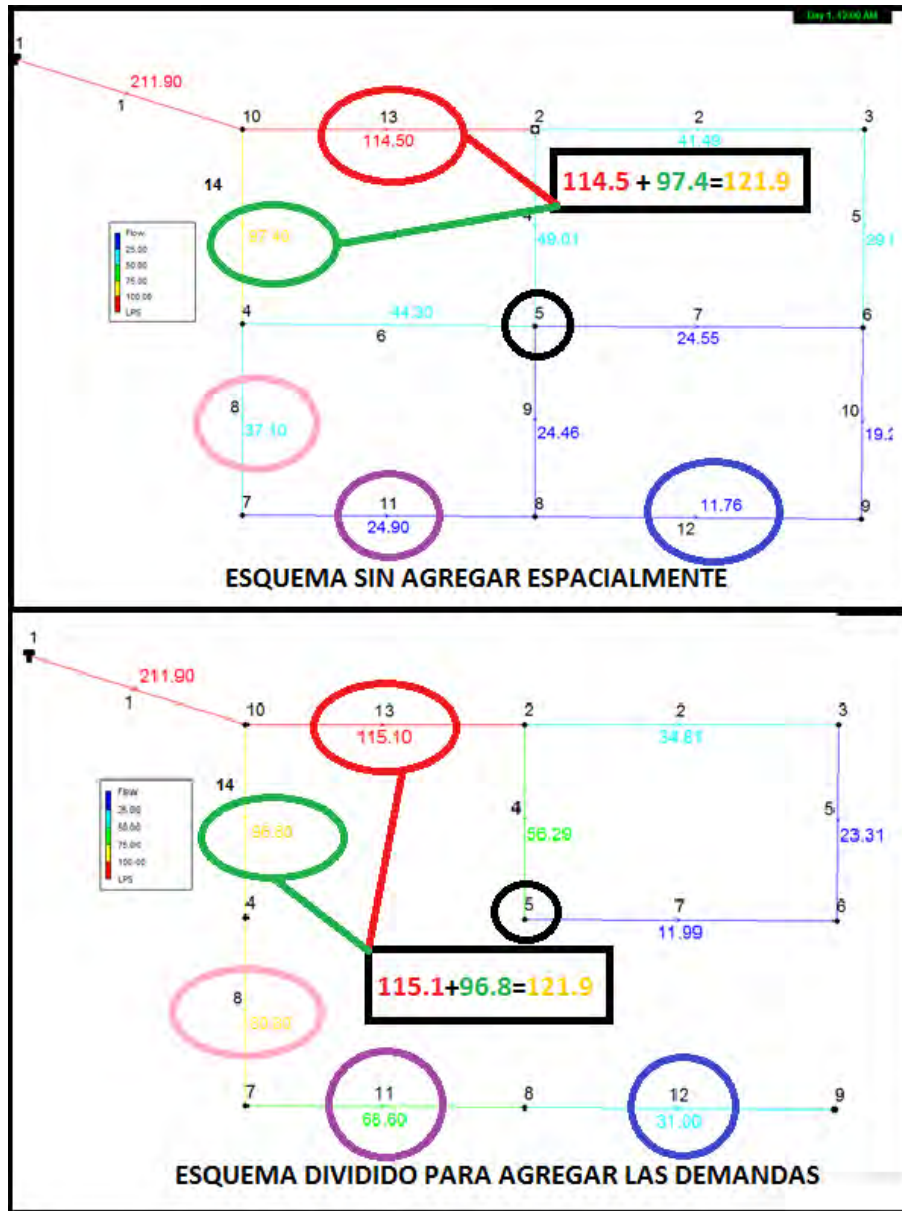


Ilustración 9-2. Comparación de una red completa y una dividida para agregar las demandas.

Por otro lado, el caudal en el tramo 1 no varía, debido a que no hay otro tramo que suministre caudal al resto de los nodos, entonces independientemente de la configuración de la red a la salida tramo, el caudal transportado será el mismo. En la presente tesis, cuando se llega a este nivel de agregación (simplificar la red hasta dejar solo el tramo 1) se considera una red aislada y se suman los consumos de los nodos dentro del sector aislado para obtener el patrón de la demanda que se agrega al nodo 10 (salida del tramo 1).

Otro parámetro importante en el estudio, es la presión en el nodo 3013, ver Gráfica 9-8, que es el adyacente a la tubería 2957, ver ubicación en la Ilustración 9-3.



Gráfica 9-8. Comparación de la presiones en el nodo 3013.

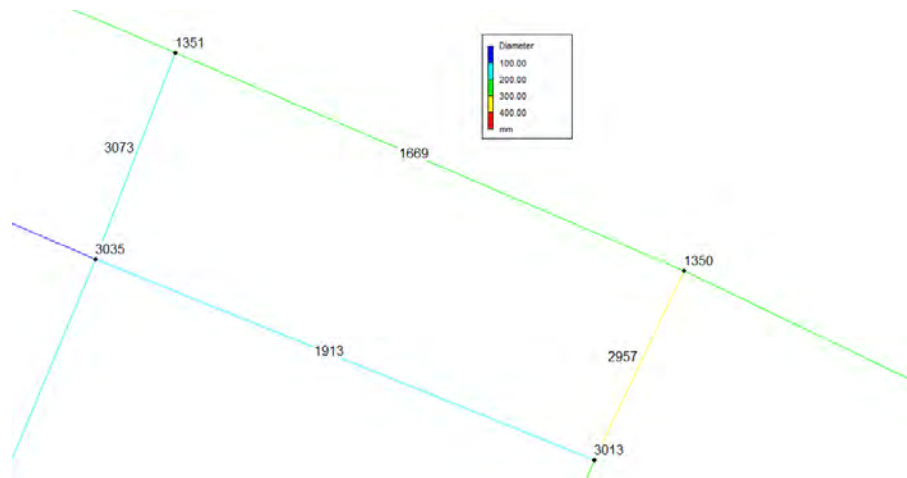


Ilustración 9-3. Ubicación a detalle de la tubería 2957 y el nodo 3013.

La variación de la presión en la Gráfica 9-8, se debe a la disminución del caudal en el nodo, ya que al transportar menos caudal la presión aumenta, sin embargo estas diferencias en la curva de la presión no son importantes.

La agregación espacial en el sector al que pertenece el nodo 165, ver Ilustración 9-4., se realizó de forma más simple, debido a que estaba compuesto en su mayoría de sectores aislados; esto da paso a que la agregación por zonas sea igual a la agregación con punto de equilibrio; como el nodo 165 se ubica en un tramo con 152.4 mm, solo se realizaron dos niveles de agregación.

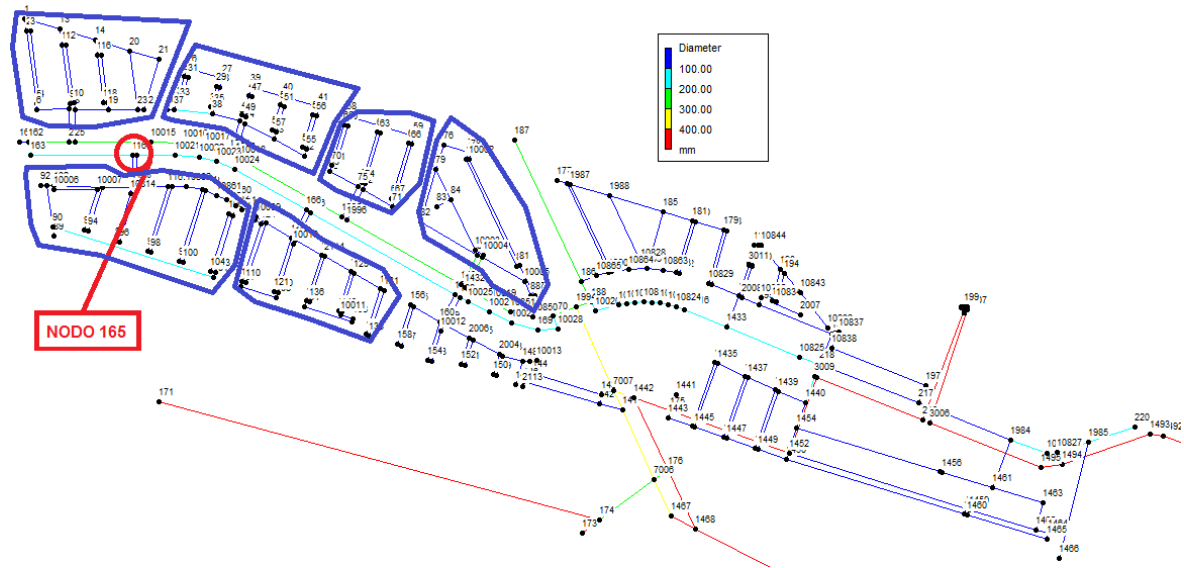
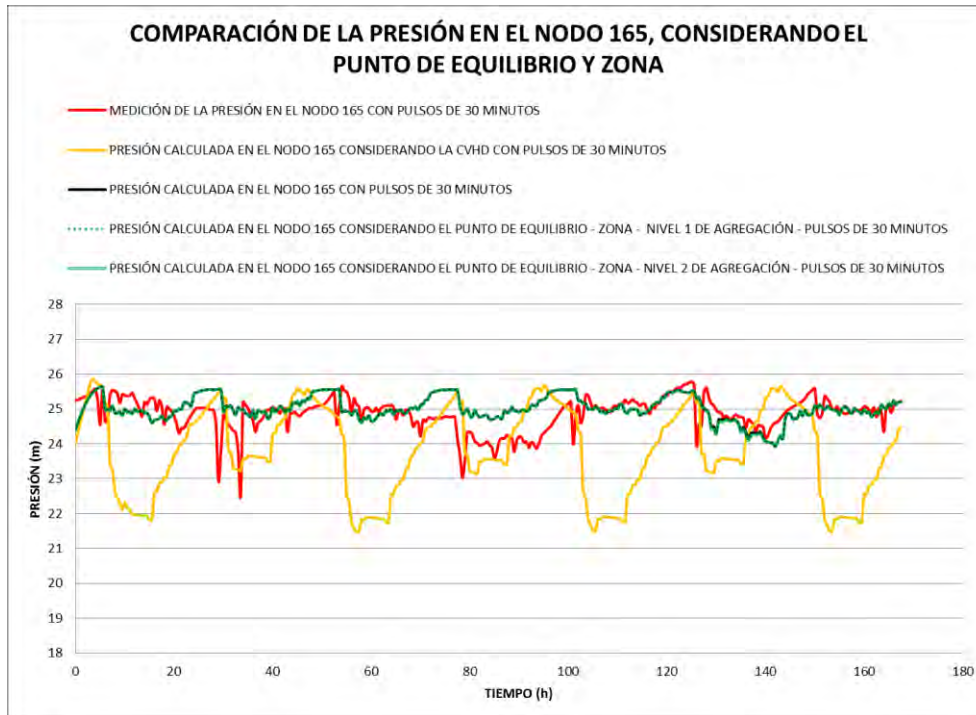


Ilustración 9-4. Sector norte donde se ubica el nodo 165.

El comportamiento de la presión en el nodo 165 considerando los casos para el análisis de la agregación espacial, se muestra en la Gráfica 9-9. De ésta prácticamente solo se ven tres curvas, la obtenida con la CVHD, la medición y las calculadas después de la agregación espacial.



Gráfica 9-9. Comparación de la presión en el nodo 165 considerando la agregación espacial por zonas y punto de equilibrio.

Los cambios en la presión no se observan gráficamente, ya que son prácticamente nulos, debido a que la redistribución del caudal también fue mínima, porque los sectores agregados estaban aislados y no mallados de forma natural.

Con base en lo anterior, se observa que el caudal es el parámetro con mayores afectaciones provocadas por la agregación espacial, principalmente en redes malladas. La presión prácticamente no resulta afectada por la agregación espacial.

El método de agregación espacial por zona resulta práctico y aceptable de emplear, pero sólo en el primer nivel de agregación. Para niveles mayores no es recomendable, dado que los caudales calculados, presentan una desviación de un 30% con respecto al cálculo empleando las SAT30 y comparado con la medición 47 por ciento. Por lo tanto este método es inestable.

Por otro lado el método de agregación con punto de equilibrio, se recomienda ampliamente ya que el caudal desviado no excede el 8 % del caudal previo a la agregación. Independientemente del nivel de agregación realizado. Por lo tanto este método resulta ser más estable.

La presión es el parámetro menos afectado, dado que depende no sólo del caudal, sino también de la presión en el nodo próximo aguas arriba, por lo que para percibir un cambio importante el cambio de la carga provocada por el caudal debe ser del orden de la presión en el nodo contiguo, ver Ecuación 9-1.

$$H_A - H_B = K_l [Q_l]^n \Rightarrow H_A = H_B + K_l [Q_l]^n \quad 9-1$$

Situación que en la presente tesis, sólo se presenta en las series estocásticas con pulsos de duración de un minuto, no así con las SAT30, que evitan esos cambios abruptos de caudal por la agregación temporal, ver Gráfica 9-5.

9.4. RECOMENDACIONES SOBRE LA AGREGACIÓN ESPACIAL

1. La simplificación de la red no solo involucra la correcta eliminación de los nodos y tuberías, sino una adecuada agregación de la demanda.
2. Se debe tener en cuenta que el comportamiento hidráulico de una red simplificada, es diferente al comportamiento hidráulico de una red completa; el parámetro hidráulico más afectado es el caudal.
3. Se debe considerar que calcular las fugas con una red simplificada bajo un método arbitrario o sin considerar los parámetros hidráulicos, puede ocasionar que éstas se subestimen o sobreestimen. En este caso se subestimó las fugas hasta el 22 % (nivel 2 y 3 de agregación por zona), ya que se desvió 47% del caudal con respecto a la medición.
4. No se recomienda el método de agregación por zona, ya que a mayores niveles de agregación resulta inestable, es decir el caudal desviado llega a ser importante (29% o más), además de no tener el conocimiento de que porcentaje de caudal fue desviado, y por ende desconocer que tan errados están los resultados.
5. Se debe tener en cuenta el nivel de simplificación de la red (hasta que diámetros eliminar), para saber que método es adecuado aplicar; el caudal redistribuido o desviado puede ser importante dependiendo del método y nivel de agregación (30 % o más).
6. Se recomienda emplear el punto de equilibrio en la agregación espacial de la red, ya que respeta el camino más probable del flujo, por ende, el orden de magnitud de los caudales que transportan los tramos de tubería. De esta forma resulta más estable independientemente del nivel de agregación.

10. CONCLUSIONES

10. CONCLUSIONES

Emplear patrones de consumo o demanda con pulsos de 30 minutos de duración, en los modelos de simulación hidráulica, permite prescindir de la elasticidad del agua en los cálculos para los casos donde $L < 4000$ m, L es la longitud de un tramo. Dado que el tiempo de desfasamiento en la llegada del pulso de la demanda equivale al 0.44% de la duración del pulso. Para casos distintos se recomienda analizar los efectos de la elasticidad del agua en la simulación hidráulica.

En caso de tener problemas con la varianza de las series estocásticas generadas con el esquema NSRPM ($\Delta t = 1$ min), se recomienda para corregirlos, emplear la agregación temporal, y así obtener series de consumo con mayor apego a la realidad (medición).

Para series estocásticas generadas con el esquema de NSRPM y pulsos de un minuto de duración (Alcocer, 2007 y Hernández, 2009), se recomienda agregar los pulsos de un minuto a pulsos con lapsos de 30 minutos, tiempo cercano al propuesto por Alcocer en el 2007 y Moreno en el 2009 (, ya que generan mejores resultados en cuanto a caudal y presión se refiere.

Las series estocásticas obtenidas con el esquema NSRPM con pulsos de un minuto, pueden representar no solo matemáticamente el comportamiento de los consumos a través de tiempo, sino también físicamente cuando se agregan los pulsos en lapsos de 30 minutos (SAT30). Por lo tanto, es mejor emplear SAT30 que series estocásticas con pulsos de un minuto, ya que atenúa la dispersión de los pulsos, que pueden llegar a causar problemas en la simulación hidráulica. Además que tiene un comportamiento hidráulico más apegado a la realidad.

Emplear SAT30 en modelos de simulación hidráulica, permite estimar no sólo las fugas presentes en el sector analizado, sino también el momento de ocurrencia y su intensidad.

Cuando se emplea la Curva de Variación Horaria de la Demanda (CVHD) en los modelos de simulación hidráulica, no se representa el comportamiento hidráulico real de la red (comportamiento cíclico). Asimismo los valores que muestra son principalmente promedios de los parámetros hidráulicos, por lo que no modela las situaciones realmente críticas en la red.

Según el método empleado para calcular la fugas y utilizando la CVHD, es posible determinarlas para intervalos de tiempo mayores a 24 horas (duración de la CVHD); sin embargo, no permite determinar el momento de la ocurrencia, ni la intensidad de la fuga con apego a la realidad, ya que el comportamiento de la CVHD es cíclico. En la realidad el consumo es aleatorio, por ende la intensidad y ocurrencia de las fugas también es aleatoria.

La simplificación de la red o agregación espacial, no sólo involucra la eliminación de los nodos y tuberías, sino una adecuada agregación de los consumos, con el fin de apegarse al comportamiento hidráulico de una red completa (considera la tomas domiciliarias), y simultáneamente conocer el grado de incertidumbre de los resultados de la simulación hidráulica.

En el proceso de agregación espacial, el caudal es la variable más sensible, mientras que la presión resulta la menos afectada.

Se debe tener en cuenta el nivel de simplificación de la red (hasta que diámetros eliminar), para saber que método es adecuado aplicar; el caudal redistribuido o desviado puede ser importante dependiendo del método y nivel de agregación (30 % o más). Esto conllevaría a análisis hidráulicos erróneos, de calidad del agua y finalmente de diseño.

La agregación por zona no resulta adecuada, ya que como se ha visto en su estudio, a mayor nivel de agregación existe mayor incertidumbre en los resultados, en este caso, la diferencia entre el caudal de la red sin agregar y la simplificada llega hasta del 30 por ciento.

Se recomienda el punto de equilibrio en la agregación de los consumos, cuando se simplifica la red. Ya que respeta el camino más probable del flujo, y por ende, la magnitud de los caudales que transportan los tramos de tubería. Logrando así, que el caudal calculado tienda mejor al comportamiento de la red que la agregación por zona, independientemente del nivel de agregación; en este caso el caudal desviado fue menor al 8 por ciento.

No es adecuado calcular las fugas con una red simplificada de forma arbitraria o sin considerar los parámetros hidráulicos, ya que se puede subestimar o sobreestimar. En este caso se subestimó las fugas hasta el 22 % (nivel 2 y 3 de agregación por zona), ya que se desvió 47% del caudal con respecto a la medición.

Actualmente hay organismos operadores que cuentan con telemetría, con ello se pueden obtener los registros necesarios para generar series sintéticas bajo el esquema NSRPM y de esta forma realizar modelos de simulación hidráulica de esos lugares con menor incertidumbre.

Para redes de distribución de agua potable donde no se cuenta con las mediciones necesarias para generar series estocásticas propias, se propone obtener series sintéticas con el esquema estocástico NSRPM de la CVHD, Alcocer (2007), Hernández (2009), Moreno (2009), Alcocer y Tzatchkov (2010).

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, I. and K. Lansey (1999). "Analysis of unsteady flow in networks using a gradient algorithm based method." In proceedings of the ASCE Specialty Conference on Water Resources, Tempe, AZ, June.

Alcocer-Yamanaka, V., Tzatchkov, V., Feliciano, D., Maravilla, E., Martínez, E. (2003). "Modelo de transporte de sustancias en flujo no permanente en redes de agua potable". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua. Informe final, 119 p.

Alcocer-Yamanaka, V., Tzatchkov, V., Buchberger, S., Arreguín, C. F. y Feliciano, G. (2004). "Stochastic Residential Water Demand Characterization". *World Water & Environmental Resources Congress - 6th. Annual Symposium on Water Distribution System Analysis, June 2004, Salt Lake City, Utah, USA.*

Alcocer-Yamanaka, V. y Tzatchkov, V. (2004). "Estudio de la variación espacial y temporal de la demanda en redes de agua potable". *Informe técnico*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 272 p.

Alcocer-Yamanaka, V. y Tzatchkov, V. (2005). "Estudio de la variación espacial y temporal del consumo intradomiciliario". *Informe técnico*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 99 p.

Alcocer-Yamanaka, V., Tzatchkov, V. y Buchberger, S. (2006). "Instantaneous water demand parameter estimation from coarse meter readings". *8th Annual Water Distribution System Analysis, Symposium. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, OH, USA.*

Alcocer-Yamanaka, V., (2007), "Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable", Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 240 p.

Alvisi, Stefano; Franchini, Marco; Marinelli, Alberto; (2003) "A Stochastic Model for Representing Drinking Water Demand at Residential Level", *Water Resources Management*, Vol 17, Num3, Junio 2003. p. 197-222.

Arreguín, F., Alcocer-Yamanaka, V., Hernández, D., (2010). "Modelación de Redes de Agua Potable con Enfoques Determinísticos y Estocásticos", *Tecnología y Ciencias del Agua*, VOL. I, Núm. 4, Octubre-Diciembre.

Bahaa, E. (1983), "Statical Properties of Nonstationary Neyma-Scott Cluster Process", *IEEE Transactions on information theory*, VOL. IT-29, No 6, November.

Blokker, E.J.M., Vreeburg, J.H.G., Buchberger, S.G., and J.C. van Dijk, (2008), *“Importance of demand modelling in network water quality models:a review”*, *Drinkin Water Engineering and Science Discussions*, 1, 1-20, 2008.

Bo, Z., Islam, S., Eltahir, E. (1994). *“Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model”*. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 3423-3435, December 1994.

Boulus, P.,Lansey, K., B.(2004). *“Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Haanbook for Engineering and Planners”*. First Edition, MWH Soft Inc., Pasadena California.

Buchberger, S y Wu, L (1995). *“A model for instantaneuous residential water demands”*, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol121, No 3, p. 232-246.

Buchberger, S.G. Carter, J.T., Y. Lee y Schade. T.G. (2003). *“Random Demands, Travel Times, and Water Quality in Deadends”*, *AWWA Research Foundation*.

CONAGUA; (2007), *“Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento; Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Agua Potable”*, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento - CONAGUA, ISBN 978-968-817-880-5.

Cross H. (1936). *“Analysis of flow in networks of conduits or conductors.”**Bulletin No. 286, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, IL.*

Entekhabi, D., Rodríguez-Iturbe, I. y Eagleson, P. (1989). *“Probabilistic Representation of the Temporal Rainfall Process by a Modified Neyman-Scott Rectangular Pulses Model: Parameter Estimation and Validation”*, *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, February, p. 295-302.

García, V. (2003). *“Modelación de la demanda urbana de agua”*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

García-Serra, J., (2002), Fuertes, V., Iglesias, P., López, G. Martínez, F., Pérez, R. *“Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua , Grupo Mecánica de Fluidos Universidad Politécnica de Valencia, ISBN:84 89487 06-5.*

Guercio, R., Magini, R. y Pallavicini, I. (2001). *“Instantaneous residencial water demand as stochastic point process”*. *Water Resources Management*, Eds. Brebbia et al., WIT Press, p. 129-138.

Hernández, D. (2009), *“Pronóstico de la Demanda de Agua Potable, Empleando el Esquema Neyman-Scott”*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 281 p.

Hollaway, M.B., (1985). *“Dynamic Pipe Network Computer Model”*, *Ph. D. thesis, Washington State University, Pullman, WA.*

Islam, R., and M. Chaudhry (1998). *“Modeling constituent transport in unsteady flow in pipe networks”* *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(11), 1115-1124.

Landsey, K., and P., Boulos. (2005) *“Comprehensive Handbook on Water Quality Analysis for Distribution Systems”* First Edition, MWH Soft Inc., Pasadena California.

Li, Z. y Buchberger, S. (2006). *PRPSym Users Guide*. University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio.

Mellor, D. (2007), *Generalized Neyman-Scott model., Version 3.3.3 beta*. GNU (General Public License), Copyright 1989, 1991 Free Software Foundation Inc, Cambridge, MA, USA.

Moreno, M. (2009), *“Análisis Espectral del Consumo Doméstico de Agua Potable.”*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 301 p.

Nadimpalli, G. y Buchberger, S (2003). *“Estimation of Parameters for Poisson Pulse Model of Residential Water Demands”*, Informe técnico, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, Agosto, p. 43.

Neyman, J. y Scott, E. L. (1958). *“A statistical approach to problems of cosmology”*, J. Royal Stat. Soc., Ser. B., Vol. 20, p. 1-43.

Ochoa, L., Rangel, J., Rodríguez, J., Delgado, J., Vázquez, A. (1994). *“Datos Básicos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento”*, Subdirección General e Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial-Gerencia de Normas Técnicas-Comisión Nacional del Agua- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 89 pp.

Rodríguez-Iturbe, I., Gupta, V. y Waymire, E. (1984). *“Scale considerations in the modeling of temporal rainfall”*, Water Resources Research, Vol. 20, No. 11, p. 1611-1619.

Rodríguez-Iturbe, I., Cox, D. e Isham, V. (1987). *“Some models for rainfall based on stochastic point process”*. Proc. R. Soc. London , A 410, p. 269-288.

Shang F., Uber, G., Rossman, L., (2008), *“Modeling Reaction and Transport of Multi Species in Water Distribution Systems”*, American Chemical Society, 42 (3), pp 808–814, DOI:10.1021/es072011z.

Rodríguez-Iturbe, I. y Eagleson, P. (1987). *“Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time”*, Water Resources Research, Vol. 23, No. 1, January, p.181-190.

Rodríguez-Iturbe, I., Cox, D. e Isham, V. (1988). *“A point process model for rainfall: further developments.”* Proc. R. Soc. London, A 417, p. 283-298.

Rossman, L. A. (2000). *EPANET Users Manual*. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH

Tzatchkov, V., Alcocer, Y. V., Arreguín, C. F. y Feliciano, G. (2005). *“Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable”*. Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XX, No.1, enero-marzo de 2005.

Todini, E. and S. Pilati (1987). "A gradient method for the solution of looped pipe networks." In *Proceeding of the international conference on computer applications for water supply and distribution*. Leicester Polytechnic, United Kingdom, Sept.

Wood, D.J. and A.G. Rayes (1981). "Reliability of algorithms for pipe network analysis." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 107(10), 1145-1161.

Wood, D.J. and J.E. Funk and P.F. Boulous (1990) "Pipe Network Transients: distributed and lumped parameter modeling." *BHRA, Proceedings of the 6th International Conference on Pressure Surges*, S.R.D. Thorley ed., Cambridge, England, 131-142.