

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Modelación de redes de agua potable con enfoques determinísticos y estocásticos.
<i>Autor / Adscripción</i>	Felipe I. Arreguín Cortés Comisión Nacional del Agua, México Víctor H. Alcocer Yamanaka Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Dante S. Hernández Padrón Universidad Nacional Autónoma de México
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 1(4): 119-136
<i>Fecha de publicación</i>	2010
<i>Resumen</i>	Uno de los parámetros más difíciles de estimar al modelar las redes de distribución de agua potable es el consumo doméstico. Se ha demostrado que éste sigue un proceso estocástico y que 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 el Modelo de Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott (Neyman-Scott Rectangular Pulses Model, NSRPM; Neyman y Scott, 1958). En el presente artículo se comparan los resultados obtenidos, empleando simulaciones de series sintéticas con carácter estocástico, producto del esquema NSRPM aplicado a la determinación de presiones, caudales y fugas; con los obtenidos con el método tradicional que utiliza la Curva de Variación Horaria de la Demanda, y con mediciones de presión y caudal hechas en el sector Humaya, en Culiacán, Sinaloa, México
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1315

MODELACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE CON ENFOQUES DETERMINÍSTICOS Y ESTOCÁSTICOS

• Felipe I. Arreguín •
Comisión Nacional del Agua, México

• Víctor H. Alcocer-Yamanaka •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Dante S. Hernández-Padrón •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Uno de los parámetros más difíciles de estimar al modelar las redes de distribución de agua potable es el consumo doméstico. Se ha demostrado que éste sigue un proceso estocástico y que 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 el Modelo de Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott (*Neyman-Scott Rectangular Pulses Model, NSRPM*; Neyman y Scott, 1958). El esquema *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 han publicado la metodología y validación inicial del proceso aplicado al consumo doméstico; sin embargo, no se ha llevado a cabo su validación en una red de distribución real y su comparación con los métodos tradicionales. En el presente artículo se comparan los resultados obtenidos, empleando simulaciones de series sintéticas con carácter estocástico, producto del esquema *NSRPM* aplicado a la determinación de presiones, caudales y fugas; con los obtenidos con el método tradicional que utiliza la Curva de Variación Horaria de la Demanda, y con mediciones de presión y caudal hechas en el sector Humaya, en Culiacán, Sinaloa, México.

Palabras clave: modelación, redes de distribución, demanda.

Introducción

En los últimos años se han desarrollado varios programas de cómputo, a fin de conocer en detalle el comportamiento hidráulico de los sistemas de distribución de agua potable.

Una de las variables hidráulicas de estos modelos es el consumo doméstico, mismo que ha sido idealizado como una variación temporal horaria. A esto se le conoce como "Curva de Variación Horaria de la Demanda (CVHD)", y es utilizada en programas comerciales de modelación de redes de agua potable, como

EPANET[®] (Todini y Pilati, 1988), *InfoWorks*[®] y *ScadRED*[®], entre otros. En otras palabras, lo anterior se traduce en asignar el comportamiento del consumo doméstico a través de una curva de variación horaria.

Sin embargo, la realidad de las tomas domiciliarias dista mucho de esta representación, pues los consumos domésticos tienden a presentar un carácter estocástico (Buchberger *et al.*, 2003; Alvisi *et al.*, 2003; Alcocer-Yamanaka, 2007) y no permanente, sobre todo en escalas de tiempo del orden de segundos. Por ello, en los últimos años se han desarrollado técnicas

con un enfoque estocástico para representar el consumo doméstico, tales como el Método de Pulsos Rectangulares de Poisson (en inglés *Poisson Rectangular Pulse Method*, abreviado como *PRP method*) (Buchberger y Wu, 1995; Buchberger et al., 2003) y el Método de Pulsos Rectangulares de Neyman-Scott (en inglés *Neyman-Scott Rectangular Pulse Method*, abreviado como *NSRPM*) (Alvisi et al., 2003; Alcocer-Yamanaka et al., 2008a, 2008b). De estas técnicas, el método *PRP* maneja la demanda instantánea con intervalo de registro de un segundo; mientras que *NSRPM* puede trabajar con diferentes intervalos de registro, al considerar una desagregación temporal de la demanda.

Estos métodos han tenido aplicación principalmente en el campo de la hidrología, en la generación de series sintéticas que representan lluvias o tormentas, según el intervalo y la duración proyectada. 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.

La ventaja del *NSRPM* es que trabaja 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.

En la bibliografía existente sólo se han registrado dos aplicaciones del esquema *Neyman-Scott Rectangular Pulses Model (NSRPM)* que intentan representar consumos domésticos (Alvisi et al., 2003; Alcocer-Yamanaka 2007).

Sitio de aplicación

Los esquemas determinístico y estocástico se aplicaron en el sector Humaya, en la ciudad de Culiacán, Sinaloa (ver figura 1), debido a

la suficiente información de campo con que se cuenta (Alcocer-Yamanaka y Tzatchkov, 2002, 2003, 2004; Alcocer-Yamanaka et al., 2004, 2007, 2008a, 2008b; Tzatchkov et al., 2004, 2005), entre la que destaca lo siguiente: mediciones de presión y caudal en fuentes de abastecimiento y puntos internos de la red de distribución de agua; nivel en el tanque de regularización; calidad del agua en fuentes de abastecimiento y puntos dentro de la red de distribución (cloro residual, carbono orgánico total (COT), pH, temperatura); y consumo intradomiciliario en 69 domicilios, con intervalo de registro de un minuto y duración promedio de tres días.

Fuentes de abastecimiento

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

Estructuras de regularización y control

Existen dos tanques de regularización: uno con capacidad de 3 000 m³ y una cota de 82.63 msnm; y otro con capacidad de 2 000 m³ y cota de plantilla de 80.00 msnm.

Población de la zona

La población en el año 2005 era de 85 483 habitantes; esto se determinó con base en el número de tomas (20 353 tomas en total) de cada colonia incluida dentro del sitio de aplicación del modelo, y el índice de hacinamiento por toma, que es de 4.20 hab/toma, de acuerdo con la información de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC).

Fugas

Según reportes del organismo operador, en la zona se tiene un porcentaje de pérdidas físicas

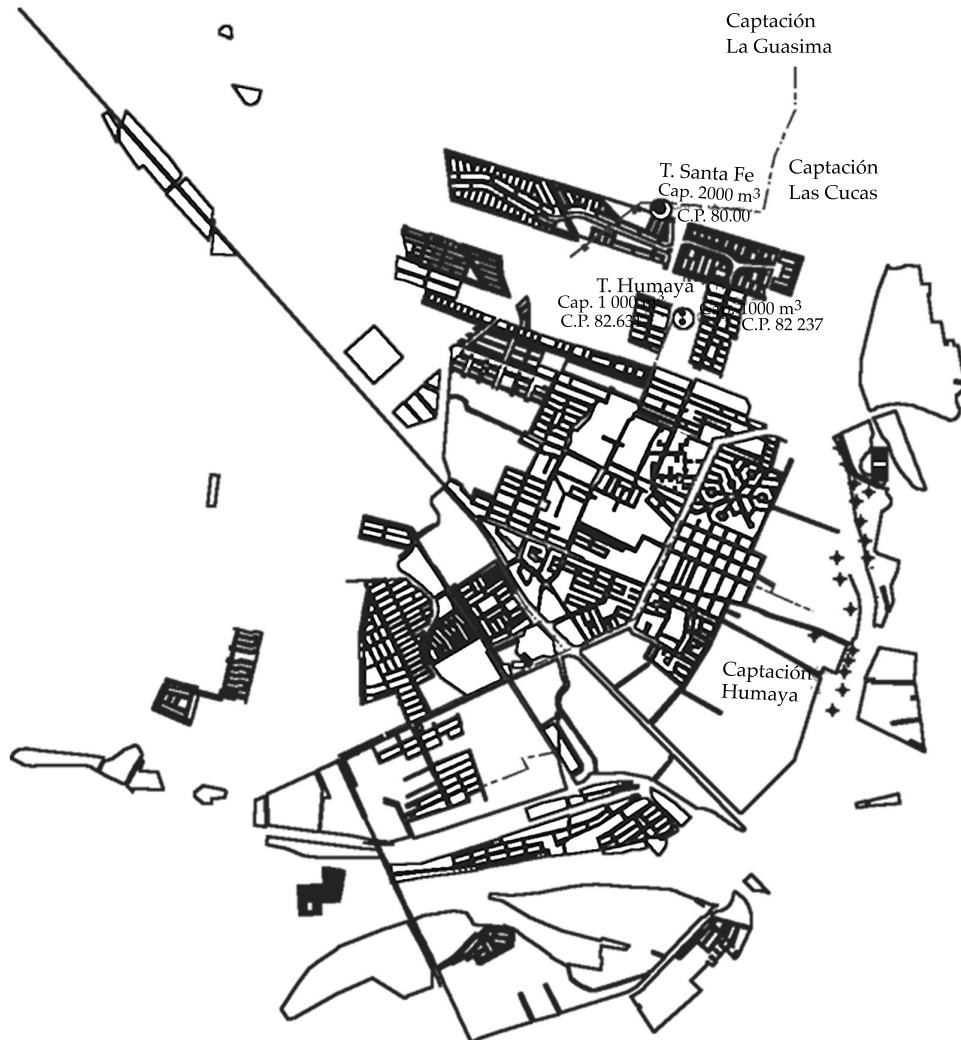


Figura 1. Representación del área de estudio, sector Humaya, en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, México.

del 30%, las cuales se originan, en su mayor parte, en tomas domiciliarias. La empresa JBS Associates Inc. realizó estudios de recuperación de agua durante los años 2000 y 2001 (JBS, 2000; JBS, 2001), que validan el porcentaje de fugas mencionado.

Modelo utilizado

Los datos geométricos de la red de abastecimiento de agua potable, que incluyen todas las tuberías (2" a 18" de diámetro) y otros datos necesarios para la modelación hidráulica, como la población y el consumo, se introdujeron en

el programa de cómputo *EPANET*[®] (ver figura 2).

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

Sitios seleccionados para comparar resultados de los dos esquemas con las mediciones en la red

Los resultados obtenidos con los esquemas determinístico y estocástico se compararon con

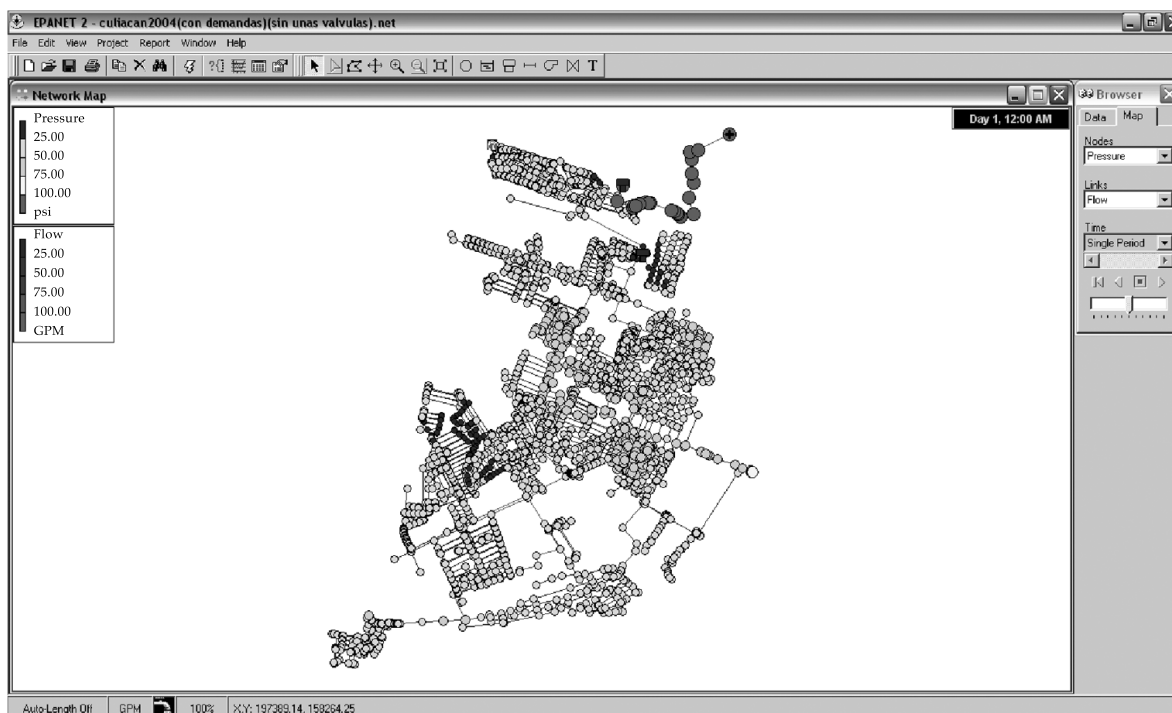


Figura 2. Red de distribución de la zona Humaya digitalizada dentro del sistema EPANET®.

las mediciones de campo, de esta forma fue posible establecer las ventajas y desventajas de ambos. En la figura 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, sólo se discutirán algunos.

Enfoque determinístico. Curva tradicional de la demanda

La curva de variación horaria es una idealización del consumo obtenida a partir de mediciones domésticas y comerciales en sectores de la red aislados hidráulicamente, llamados distritos hidrométricos. La Comisión Nacional del Agua la obtuvo mediante el registro de los consumos medidos aleatoriamente en los distritos con tres diferentes niveles socioeconómicos y uno comercial, en varias ciudades, comparándolos con el caudal medido a la entrada de los distritos (ver figura 4).

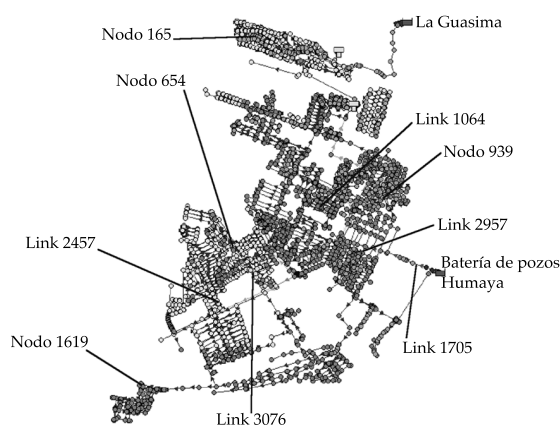


Figura 3. Ubicación en la red de nodos y tramos analizados.

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 puede observar que la curva está suavizada, lo cual, como se mostrará más adelante,

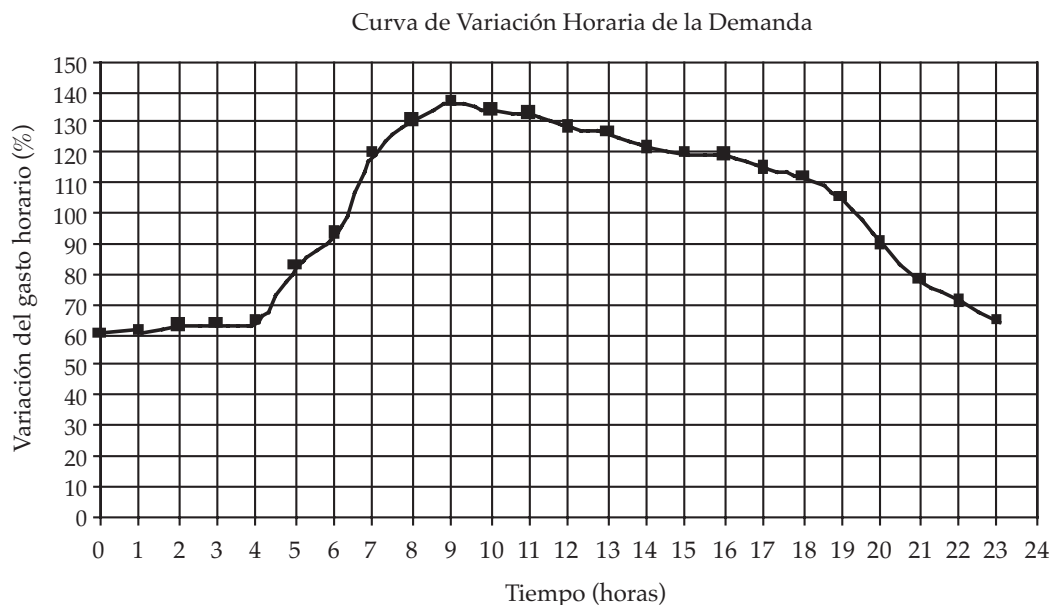


Figura 4. Curva de Variación Horaria de la Demanda para la república mexicana (Tzatchkov, 2007).

no ocurre en la realidad, al compararla con mediciones continuas de los consumos de una casa-habitación.

Presiones y caudales calculados

Se presentan las presiones calculadas con el programa *EPANET*, en el nodo 165 (figura 5) (ver ubicación en la figura 3).

Se puede observar que la variación de presión tiene un comportamiento cíclico, dado que se mantiene la demanda base y el patrón de comportamiento es introducido 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 22.00 mca, respectivamente.

La figura 6 muestra el área de influencia del tramo 2957, de 12 pulgadas de diámetro, que suministra una zona dentro del sitio analizado; la figura 7 ilustra el comportamiento de los caudales obtenidos con el mismo programa. En éste se tiene también un comportamiento cíclico y caudales máximos de 28.0 l/s y mínimos de 10.0 l/s (aproximadamente), todos positivos.

Conclusiones de este esquema

Se observa que las curvas de comportamiento de caudales y de presiones son cíclicas y suavizadas debido a la escala horaria que establece la Curva de Variación de la Demanda.

En el tramo analizado se observó que el caudal tiene signos siempre positivos; el hecho de que no haya cambio de signo en el caudal significa que el flujo sigue el mismo trayecto de “entrada” y “salida” del tramo.

Enfoque estocástico

El reconocimiento de que los consumos se producen aleatoriamente ha motivado a algunos investigadores (Kiya y Murakawa, 1989; Buchberger y Wu, 1995) a proponer que la ocurrencia de consumos a lo largo del tiempo sigue un proceso de Poisson. Esta hipótesis fue verificada por Buchberger *et al.* (2003). Dicho proceso resulta no homogéneo debido a que los consumos a lo largo del día varían considerablemente de unas horas a otras. Cada consumo individual de agua se

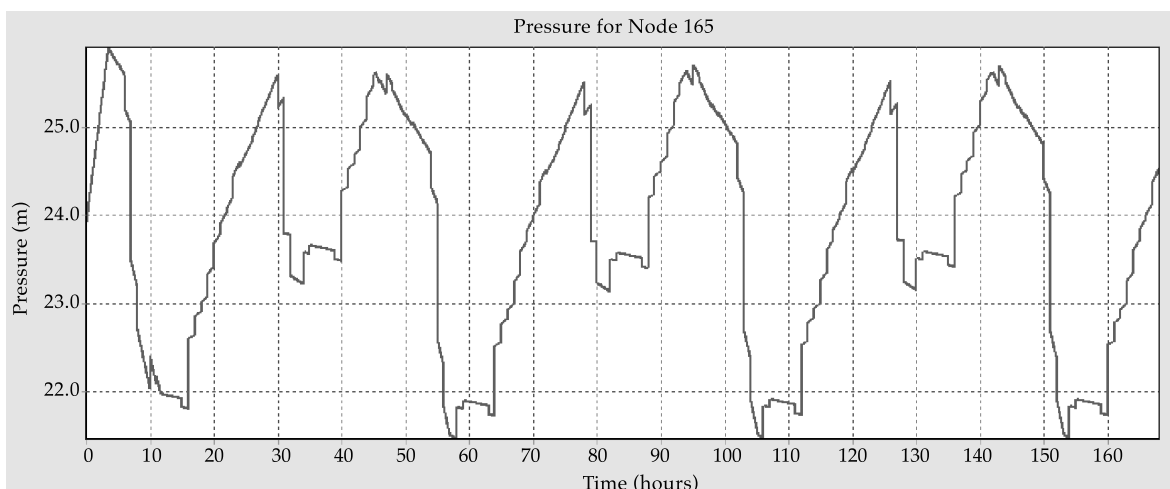


Figura 5. Presión obtenida en el nodo 165 para el escenario, empleando la CVHD y el programa EPANET.



Figura 6. Área de influencia del tramo 2957 y su salida a través del tramo 22.

representa como un pulso rectangular con una altura (intensidad) x y un ancho t (duración) aleatorios.

Recientemente se han desarrollado modelos de simulación de consumo como el *Poisson Rectangular Pulses (PRP)* (Buchberger

et al., 2003), que permiten generar series de los consumos bajo ciertos criterios estocásticos, que se basan en los siguientes parámetros básicos: tasa de llegada o frecuencia de la ocurrencia de los pulsos individuales (λ), intensidad promedio de los pulsos (μ_x),

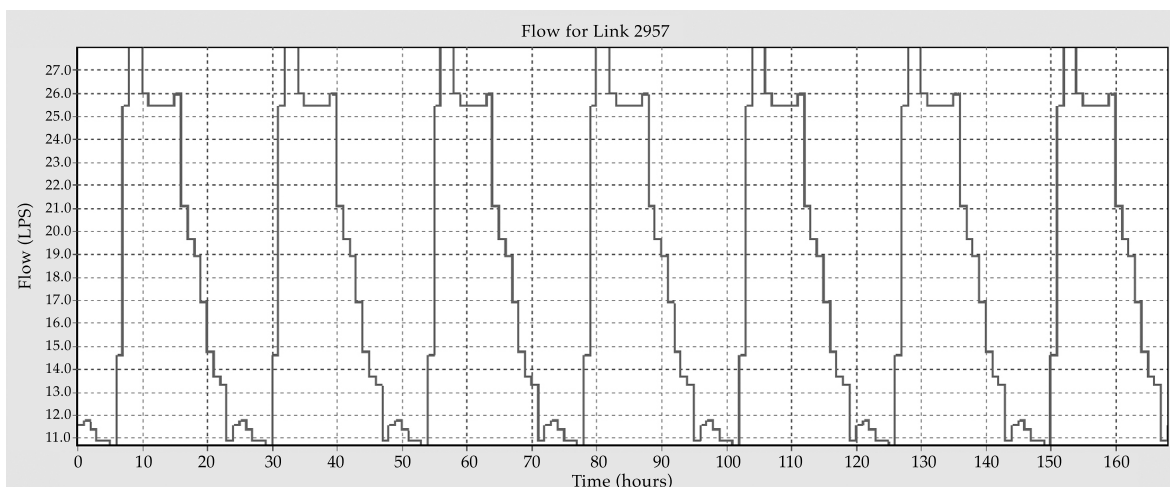


Figura 7. Caudales calculados para el tramo 2957, con la CVHD y EPANET.

varianza de esa intensidad $Var(\mu_x)$, duración promedio de los pulsos (η) y la varianza de esa duración $Var(\eta)$. La obtención de estos parámetros se ha realizado generalmente con base en mediciones de consumo con intervalo de registro de un segundo. Aunque realizar mediciones con intervalo de registro de un segundo tiene la ventaja de obtener directamente la evolución real del consumo doméstico, se requiere de sofisticados equipos de medición y almacenamiento de datos, y de un elevado esfuerzo computacional en el análisis de los datos generados (Buchberger et al., 2003). Estas razones limitan métodos como el PRP y dificultan su aplicabilidad en proyectos de investigación en la actualidad, así como el desarrollo de proyectos de diseño y análisis de las redes de distribución en el futuro, en especial en países en vías de desarrollo, donde la información e infraestructura generalmente es limitada.

En los últimos años se han desarrollado técnicas orientadas a la estimación indirecta de los parámetros λ , μ_x , $Var(\mu_x)$, η y $Var(\eta)$, de registros de la demanda con intervalos más largos, destacando la desagregación espacial y temporal (Alcocer-Yamanaka et al., 2006, 2007, 2008a, 2008b, 2009; Guercio et al., 2001;

Rodríguez-Iturbe et al., 1984, 1987). En esas técnicas, la estimación de los parámetros 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, que se minimiza a través de técnicas de programación no lineal, obteniéndose a partir de ello los parámetros deseados. Nadimpalli y Buchberger (2003) realizaron una comparación entre esas técnicas aplicadas al problema de estimación de los parámetros con base en ejemplos. En todas ellas se supone conocida la variación de la demanda en una tubería que abastece cierto número de casas. Las técnicas se diferencian entre sí por 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; la tasa de llegada de los pulsos, y por el proceso estocástico que se emplea como base para formular los momentos teóricos involucrados (Rodríguez-Iturbe et al., 1984).

El esquema de Neyman-Scott ha sido empleado previamente en la generación del consumo por Alvisi et al. (2003), y Alcocer-Yamanaka et al. (2007, 2008a, 2008b, 2009a,

2009b). Los momentos de segundo orden del proceso agregado $Y_i^{(h)}$ son los siguientes (Entekhabi y Bras, 1990):

$$E[Y_i^{(h)}] = \frac{\lambda}{\eta} \mu_C \mu_X h \quad (1)$$

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

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

En donde λ^{-1} representa el tiempo promedio entre dos eventos; β^{-1} , el tiempo promedio entre cada pulso individual y el origen del evento; η^{-1} , la duración promedio de los pulsos; μ_X , la intensidad promedio de los pulsos, y h es el intervalo de agregación/desagregación analizado.

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

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

De 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, $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 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, varianza y covarianza en la ecuación (4).

En la formulación del esquema de Neyman-Scott se debe establecer el intervalo de análisis buscado para la ejecución del esquema de optimización (para este caso en particular, el tiempo será de un minuto). Enseguida 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 del modelo (llamadas variables de decisión en un esquema de optimización).

Para aplicar el esquema de Neyman-Scott en un modelo de red de agua potable es necesaria la asignación de patrones estocásticos generados de manera aleatoria a la demanda en cada nodo del modelo (cada nodo contiene cierta cantidad variable de viviendas), en función del nivel socioeconómico, lo que implica introducir patrones de consumo con una longitud de 10 080 datos, correspondientes a cada minuto transcurrido durante una semana. La asignación de los patrones estocásticos debe considerar también el nivel socioeconómico de las viviendas, para lo cual se dividieron en tres grupos (bajo, medio y alto), y se generaron patrones estocásticos diferentes para cada grupo.

Para tomar en cuenta el hecho de que la demanda de agua potable es diferente durante el día, las series generadas, con sus parámetros estadísticos, se dividieron en tres bloques horarios, como se describe más adelante en este artículo. Inicialmente se determinaron los parámetros necesarios para la generación de las series sintéticas en las 69 casas-habitación en que se registró la variación de la demanda temporal, después se generaron cincuenta series sintéticas, con la finalidad de

ensamblarlas para su validación. Entiéndase por “ensamble” al proceso de generar cincuenta series y posteriormente promediar los valores de los momentos estadísticos de todas éstas.

Así, comparando el momento observado con el momento de las series ensambladas de cada bloque horario, se determinó si se aceptaban o no las series sintéticas correspondientes para ser utilizadas en el esquema de simulación estocástico. En otras palabras, este proceso establece que en los casos donde los valores entre los momentos (observados y ensamblados) difieran, las series sintéticas generadas serán consideradas como no válidas para el patrón analizado y serán desechadas; en su lugar se generarán nuevas series. Caso contrario, cuando la diferencia entre los momentos tienda a cero, el proceso y las series sintéticas generadas son considerados válidos.

Posteriormente se generaron 69 curvas de patrones de consumo sintéticos, asignando aleatoriamente bloques horarios de la serie generada para formar un patrón sintético de una semana de longitud de lunes a domingo, distribuyendo aleatoriamente los 69 patrones sintéticos a cada casa-habitación, en función de su nivel socioeconómico.

Tratamiento del registro de datos de consumos domésticos

Para el tratamiento de los datos registrados se realizó un promedio de los consumos,

separando los registros en bloques horarios de los diferentes días de la semana, en función del comportamiento típico de la demanda de agua potable (ver cuadro 1), donde puede observarse la separación de los días laborales, fines de semana y días festivos. La separación en bloques de los datos corresponde a la disparidad numérica que presentan los valores de los momentos observados en los distintos horarios. Ello facilita la obtención de una solución óptima durante el proceso de optimización y, por ende, la generación de series sintéticas con mayor apego a la realidad.

Una vez separados los datos registrados en campo en los bloques marcados en el cuadro 1 se obtienen tres bloques y de éstos, ocho subbloques horarios: cuatro para los días de lunes a viernes, dos para el sábado y dos para el domingo.

Una vez obtenidas las series promediadas para cada bloque horario se determinan sus momentos, de media, varianza, covarianza y volumen acumulado. Posteriormente, para obtener los parámetros estadísticos adecuados y válidos dentro del esquema Neyman-Scott es necesario acotar el espacio de solución del esquema de optimización, empleando rangos de búsqueda a partir de la reducción de los intervalos en el orden de magnitud de las variables de decisión. Finalmente se generan las series sintéticas que serán implementadas dentro del programa de dominio común *EPANET*.

Cuadro 1. Bloques horarios para el análisis de consumos registrados en función del comportamiento típico de la demanda.

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre			
Día de la semana	1 ^{er} bloque	2 ^o bloque	3 ^{er} bloque
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Generación de series sintéticas y determinación de rangos de búsqueda en el esquema de optimización para obtener los parámetros del modelo Neyman-Scott

Una vez obtenidos los momentos observados para los domicilios donde se hicieron las mediciones, mediante el esquema de optimización se determinan los parámetros estadísticos $\{\lambda, x, \mu, c, \eta, \beta\}$ que intervienen en los momentos teóricos representados en la ecuación (4) (función objetivo), para su posterior introducción en el modelo *NSRPM*.

La generación de las series se hizo con base en el modelo de dominio público contenido en el *Rainfall Data Modelling Portal (RDMP)* (Mellor, 2007). Dado que se trata de un evento estocástico, es importante señalar que se deberá realizar cierto número de simulaciones dentro del *NSRPM*, considerando una semilla de generación de números aleatorios diferente entre una simulación y otra. Finalmente, se comparan las series sintéticas obtenidas a partir del *NSRPM* con la serie original medida en campo.

Los rangos de búsqueda inicialmente utilizados para el cálculo de la función objetivo y de los parámetros para cada vivienda fueron los indicados en el cuadro 2.

Una segunda aproximación de los rangos de búsqueda de los parámetros mencionados se hizo usaron datos reportados por Feliciano (2005), se usaron valores de frecuencia λ^{-1} desde 0.0689 min^{-1} (14.51 minutos) hasta los 0.04305 min^{-1} (23.23 minutos). Con éstos se determinó un rango de búsqueda de 1 min^{-1} (1 minuto) hasta 0.0404 min^{-1} (24.75 minutos), para tener un margen más amplio de localización en el esquema de optimización, pues se observó que al dejar un rango menor o igual a los 24.75 minutos, ocasionaba que el resultado en la función objetivo se alejara de cero. Es importante mencionar que los rangos reportados por Feliciano (2005) corresponden a una zona aledaña a la actual y el intervalo de registro empleado fue de un segundo.

Cuadro 2. Rango de búsqueda inicial para los parámetros del modelo Neyman-Scott.

Parámetro	Desde	Hasta
$\lambda^{-1} (\text{min}^{-1})$	1	0.016667
$\beta^{-1} (\text{min}^{-1})$	1	0.05
$\eta^{-1} (\text{min}^{-1})$	10	0.007
$\mu_x (\text{l/min})$	1	8
$E(c)$	1	20

El siguiente parámetro que se ajustó fue la intensidad promedio de los pulsos μ_x . Los valores medios de la intensidad de los pulsos considerados fue de 1 a 8 l/min, sin embargo tales valores “forzaban” en cierta forma al esquema de optimización, teniéndose como resultado valores de volumen consumido muy altos (irreales). Después de varias pruebas, se determinó que había que reducir el valor de 8 a 6 l/min, para hacer menor la intensidad promedio y con esto disminuir la intensidad de los pulsos en la serie sintética, lo cual resultó en que también la varianza observada se aproximase de mejor manera a la varianza de las series sintéticas (ver cuadro 3).

En el cuadro 4 se muestran los resultados únicamente de tres de las viviendas (el desglose se omite por motivos de extensión del manuscrito).

Como se mencionó anteriormente, con los parámetros calculados se procedió a la generación de las cincuenta series sintéticas con datos a cada minuto, por bloque horario de cada vivienda, generando aproximadamente 27 000 series sintéticas, que cubren los consumos

Cuadro 3. Rango de búsqueda definitivo para obtener los parámetros del modelo Neyman-Scott.

Parámetro	Desde	Hasta
$\lambda^{-1} (\text{min}^{-1})$	1	0.0404
$\beta^{-1} (\text{min}^{-1})$	1	0.05
$\eta^{-1} (\text{min}^{-1})$	10	0.007
$\mu_x (\text{l/min})$	1	6
$E(c)$	1	20

Cuadro 4. Resultados de tres viviendas, a partir del esquema de optimización para obtener los parámetros del Modelo Neyman-Scott.

Augurio # 2989, 4 de Marzo										
	L-V 0 a 6	L-V 6 a 20	L-V 22 a 24	L-V 20 a 22	Sáb. 0 a 7	Sáb. 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		
E (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	3.154514		
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 =	3.35276E-20	0.072953397	5.69345E-21	5.55823E-21	2.37643E-20	1.85631E-21	0.015818391	1.26379E-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	Sáb. 0 a 7	Sáb. 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	0.030688862	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		
E(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 =	1.38191E-20	0.041439575	7.12556E-21	9.23565E-23	0.201305457	3.42168E-19	0.053939499	8.81527E-22		
Diana 3784, Canaco										
	L-V 0 a 6	L-V 6 a 20	L-V 22 a 24	L-V 20 a 22	Sáb. 0 a 7	Sáb. 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		
E (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	2.54572705	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 =	4.72601E-08	1.28771E-12	2.25181E-21	1.5944E-21	6.94826E-21	0.070586263	3.98085E-06	0.017994104		

de una semana para las 69 viviendas analizadas. Los resultados obtenidos en el cálculo del esquema de optimización para la generación de los parámetros que requiere el modelo Neyman-Scott se presentan en Hernández (2009).

En cada nodo del modelo existe una cantidad no uniforme de casas asignadas, por lo que para cada casa se asigna un patrón estocástico y una demanda media con base en éste. Se consideró una duración de los siete días de la semana, y se asignaron las demandas en los nodos en función de la cantidad de predios que cubriría cada uno de ellos. Las demandas asignadas se obtuvieron de los 69 patrones sintéticos de consumo generados previamente. Es importante mencionar que los patrones sintéticos corresponden al consumo de las casas-habitación, de tal forma que en EPANET® se introduce cada patrón sintético a la casa correspondiente.

De manera aleatoria se asignaron los 69 patrones sintéticos en función del nivel socioeconómico de las casas-habitación. Los patrones contienen 10 080 datos, que corresponden a los consumos con intervalo de registro de un minuto y duración de siete días.

Enseguida se muestran los resultados para este esquema en los mismos nodos y tramos que se consideraron en el determinístico, y con ello se realiza una comparación de los resultados de ellos y con mediciones de campo. Vale la pena señalar que el caudal asignado para generar en el programa EPANET® la curva característica sintética del bombeo en la batería de pozos fue de 104.22 litros por segundo.

Comparación de resultados entre los modelos estocástico y determinístico

Presiones y caudales calculados

Se presentan las presiones calculadas con el programa EPANET en el nodo 165 (figura 8) (ver ubicación en la figura 3). Se observa

una fluctuación diaria debido a la variación estocástica del patrón de las series sintéticas, iniciando el día domingo. Las presiones máximas y mínimas medidas en metros de columna de agua (mca) son 26.34 y 2.69 mca, respectivamente.

Continuando el análisis se revisó el comportamiento del flujo en el mismo tramo examinado con el esquema determinístico (tramo 2957). En la figura 9 se muestra el flujo en el tramo (suministro a una zona del sitio analizado) de 12 pulgadas de diámetro, donde se obtuvieron caudales en un solo sentido de la tubería, con valores entre 106.08 l/s y cercanos a cero litros por segundo.

El comportamiento de los caudales y presiones es muy variable bajo este esquema. Los cambios repentinos son ocasionados por la aleatoriedad con que se formaron los patrones de consumo, lo que provoca que en ciertos instantes (del orden de minutos) existan consumos altos y en el siguiente la demanda disminuya hasta el punto de llegar a ser nula. Todas estas variaciones las absorben el tanque de regulación y los equipos de bombeo.

Los caudales que se presentan en los nodos en este esquema pueden ser positivos o negativos a lo largo 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 señalar que los patrones estocásticos se pueden variar utilizando un bloque cualesquiera de las series sintéticas generadas; en este caso se utilizó aleatoriamente el bloque 33.

En el cuadro 5 se muestra el resumen de resultados de presión para el nodo 165, considerando ambos enfoques.

Las presiones máximas y mínimas que se presentan en el escenario estocástico ocurren en lapsos hasta de un minuto, siendo éste el tiempo de análisis que se introdujo en la simulación. Vale la pena explicar que las presiones mínimas que se presentan en los

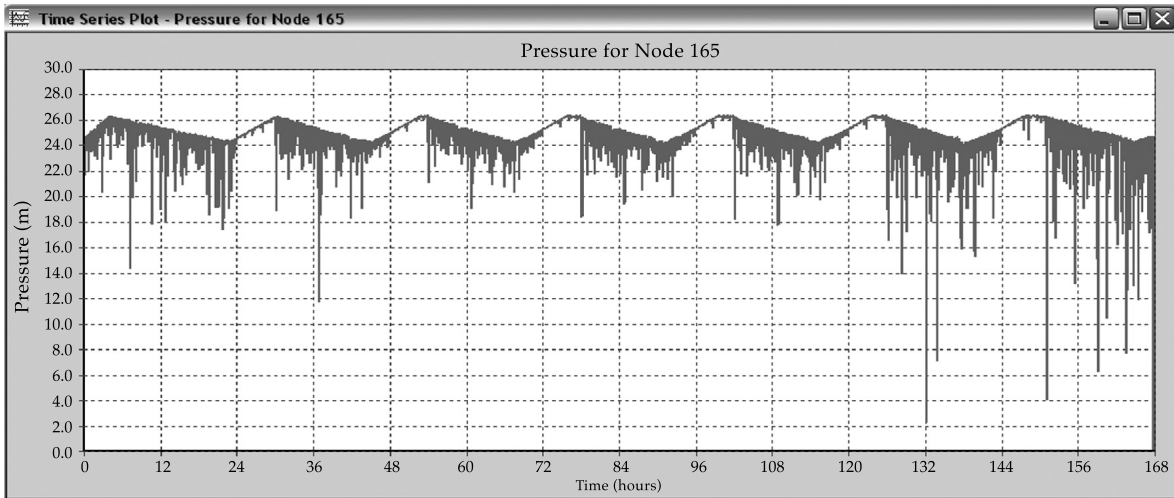


Figura 8. Presión obtenida en el nodo 165 para el escenario estocástico.

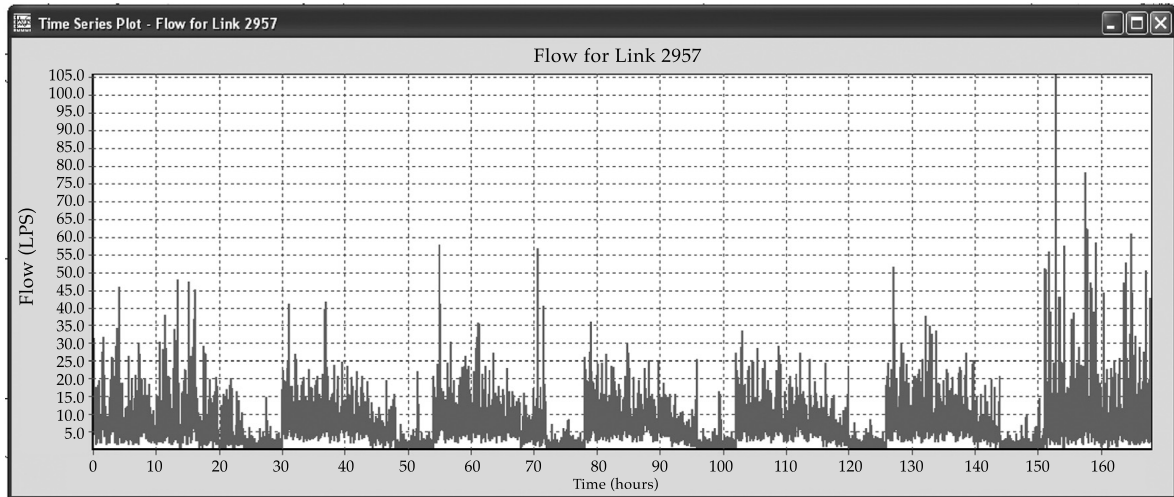


Figura 9. Caudales calculados para el tramo 2957 en el escenario estocástico.

Cuadro 5. Resumen de resultados de presión en el nodo 165 para ambos escenarios.

Escenario	Nodo	Presión máxima (m)	Presión mínima (m)
CVHD	165	25.88	21.83
Estocástico	165	26.34	2.69

resultados de la simulación con el modelo estocástico, en particular la presión negativa que se obtiene, corresponden a las premisas en que se basa el programa *EPANET*, es decir, un análisis de periodos extendidos, donde las variaciones de gasto y presión son lentas, pero pueden ser no realistas en este caso de demanda estocástica bruscamente variable. Ello indica que la modelación debería hacerse con

un modelo dinámico más refinado, capaz de representar variaciones bruscas de las variables hidráulicas, pero la discusión de tal modelo está fuera del alcance del presente artículo.

En relación con los flujos, en el cuadro 6 se observa que en el esquema estocástico existen caudales mayores a los obtenidos con el esquema utilizando la CVHD.

Finalmente se observa que las presiones y los caudales resultan diferentes con ambos esquemas debido a la observación hecha anteriormente.

Comparación de presiones y caudales obtenidos con los esquemas planteados y las mediciones de campo

En campo se efectuaron mediciones de presión y caudal en varios nodos y tramos en los cuales se aplicaron los esquemas determinístico y estocástico; aquí se presentarán sólo algunos por razones de espacio. En la figura 10 se muestra la comparación entre las presiones medidas en el punto ubicado en la colonia "Santa Fe" y las obtenidas con ambos esquemas en el nodo 165. Se observa que las mediciones y el esquema estocástico representan mejor el comportamiento del consumo por pulsos, y que si se obtienen curvas promedio en ambos casos, la coincidencia es mayor que con la CVHD.

Como en el caso de las presiones, las mediciones de caudal y el esquema estocástico reflejan mejor el patrón de consumo por pulsos (ver figura 11).

Otra ventaja del enfoque estocástico es que permite estimar las fugas en la red. Por la forma en que fue obtenida la CVHD, ésta incluye las pérdidas físicas; si se compara con

las mediciones, puede notarse que la CVHD se ubica por encima de la curva que representa la demanda de los usuarios.

Conclusiones

En este artículo se muestra la aplicación de una metodología que considera conceptos estocásticos para determinar patrones de consumo doméstico. Se emplea el esquema de Neyman-Scott, que al introducirse en un modelo de simulación hidráulica permite obtener resultados más parecidos al funcionamiento de una red de agua potable.

Actualmente el enfoque empleando la CVHD resulta un apoyo sencillo para los ingenieros e investigadores dedicados al análisis y el diseño de los sistemas de distribución de agua potable. Sin embargo, esta curva tiende generalmente a sobredimensionar y, en algunas ocasiones, subdimensionar la infraestructura hidráulica, producto de los resultados obtenidos en las simulaciones y, por ende, diseñadas de esta forma. Se recomienda al proyectista tener en consideración esta observación y si de todas formas usa la CVHD, obtenerla por mediciones en campo para cada sitio analizado.

El resultado de este trabajo es el inicio en la aplicación de este enfoque tendiente a convertirse práctico y sencillo para los ingenieros e investigadores dedicados a los sistemas de distribución de agua potable. Ello podría concretarse a través de la incorporación de esta metodología a través de un módulo dentro de programas comerciales como *EPANET*.

Finalmente, en el ámbito local, la implementación del modelo de simulación hidráulica, considerando el consumo apoyado en un

Cuadro 6. Resumen de resultados de caudales en tramos para los dos escenarios.

Escenario	Tramo	Colonia	Diámetro (in)	Q máx (l/s)	Observaciones
CVHD	2957	Infonavit Humaya	12	28.13	Sin cambio en sentido del flujo
Estocástico	2957		12	106.08	Sin cambio en sentido del flujo

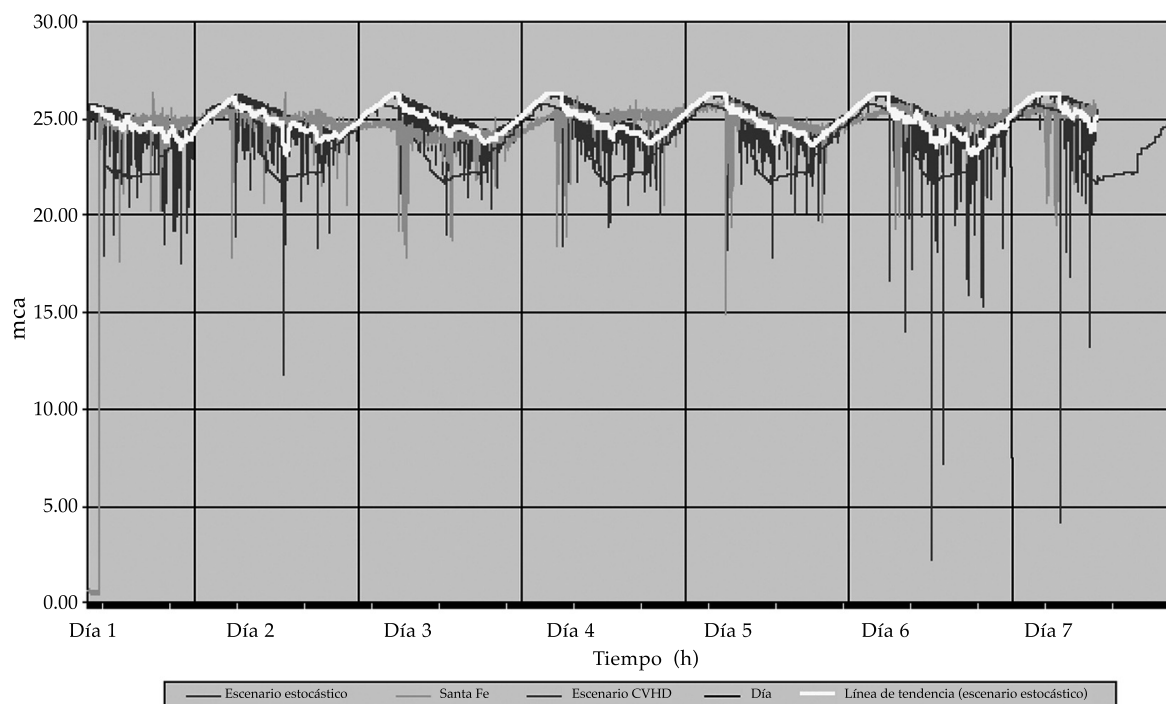


Figura 10. Comparación de las presiones registradas en el nodo 165 con los esquemas utilizados.

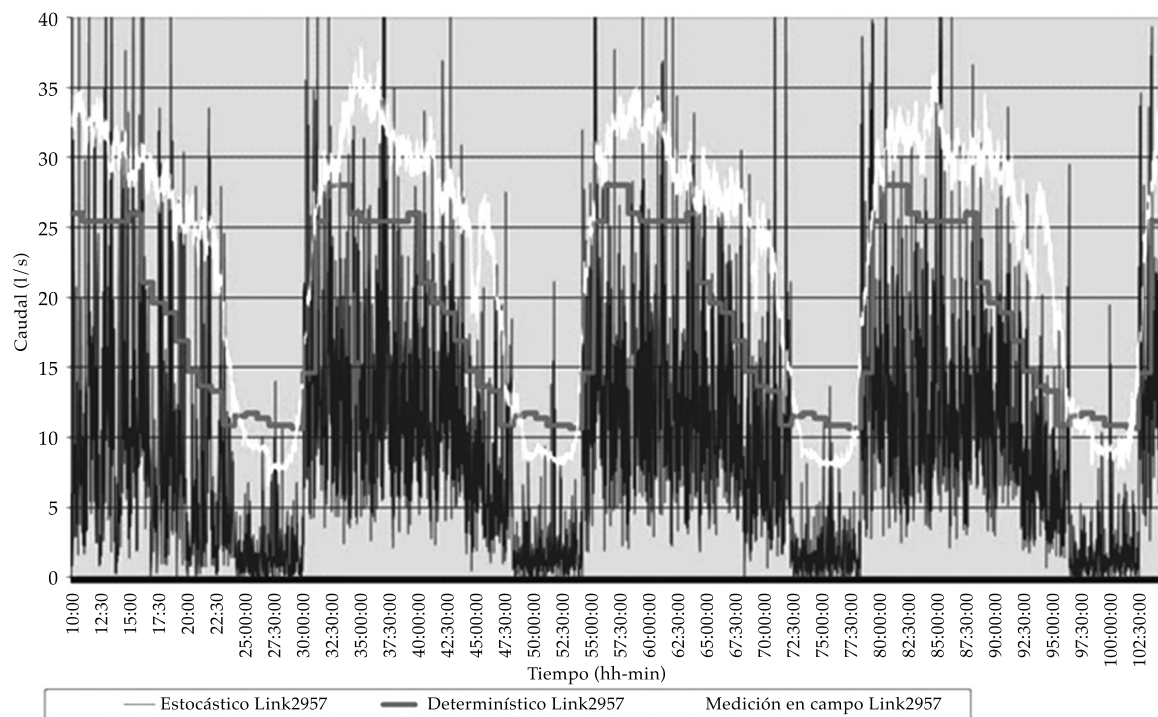


Figura 11. Comparación con caudales medido, resultante con CVHD y estocástico, en el tramo 2957.

enfoque estocástico, permitirá al organismo operador emplearlo como toma de decisiones ante posibles fuentes de abastecimiento externas, dado que es una zona de incremento poblacional elevado, así como en el diseño de un programa de rehabilitación y sustitución de tuberías debido a los problemas de incrustación de fierro y manganeso que sufre el área de estudio.

Se recomienda como trabajo futuro automatizar el proceso de generación de las series de demanda estocástica, estableciendo un esquema de Monte Carlo en el proceso de simulación.

Publicado por invitación

Referencias

- ALCOCER-YAMANAKA, V. y TZATCHKOV, V. *Implementación y calibración de un modelo de calidad del agua en sistemas de agua potable. Informe final.* Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2002.
- ALCOCER-YAMANAKA, V. y TZATCHKOV, V. *Modelo de transporte de sustancias en flujo no permanente en redes de agua potable. Informe final.* Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2003.
- ALCOCER-YAMANAKA, V. y TZATCHKOV, V. *Estudio de la variación estocástica de la demanda en redes de agua potable. Informe final.* Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2004.
- ALCOCER-YAMANAKA, V., TZATCHKOV, V. y ARREGUÍN, F.I. Modelo de calidad del agua en redes de distribución. *Ingeniería hidráulica en México.* Vol. XIX, núm. 2, abril-junio de 2004, pp. 77-88.
- ALCOCER-YAMANAKA, V. *Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable.* Tesis de doctorado. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2007, 240 pp.
- ALCOCER-YAMANAKA, V. y TZATCHKOV, V. *Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución de agua potable.* Serie Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, MAPAS. México, D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2007, 262 pp.
- ALCOCER-YAMANAKA, V., TZATCHKOV, V., GARCÍA, R., BUCHBERGER, S., ARREGUÍN, F.I. y LEÓN, T. Modelación estocástica del consumo doméstico empleando el esquema de Neyman-Scott. *Ingeniería hidráulica en México.* Vol. XXIII, núm. 3, julio-septiembre de 2008a, pp. 105-121.
- ALCOCER-YAMANAKA, V., TZATCHKOV, V. y BOURGUETT, V. Desagregación temporal de lecturas acumuladas de consumo de agua potable por medio de métodos estocásticos. *Interciencia.* Vol. 33, núm. 10, 2008b, pp. 725-732.
- ALCOCER-YAMANAKA, V., ALDAMA, A., TZATCHKOV, V., ESPINOSA, A. y ARREGUÍN, F.I. Análisis espectral de registros de consumo doméstico. *Ingeniería hidráulica en México.* Vol. XXIV, núm. 4, octubre-diciembre de 2009a, pp. 105-121.
- ALCOCER-YAMANAKA, V. y TZATCHKOV, V. Estimación de parámetros del consumo doméstico de agua potable de lecturas acumuladas. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo.* Vol. X, núm. 3, julio-septiembre de 2009, pp. 239-248.
- ALCOCER-YAMANAKA, V., TZATCHKOV, V. and ZHENG, W. Spectral analysis of instantaneous residential water demand series. *Integrating Water Systems - Computing and Control in the Water Industry (CCWI).* Sheffield, UK: CRC Press/A.A. Balkema Publishers-Taylor & Francis Group, Joby Boxall and Cêdo Maksimović-Editors, 2009b, pp. 503-508.
- ALVISI, S., FRANCHINI, M. and MARINELLI, A. A Stochastic Model for Representing Drinking Water Demand at Residential Level. *Water Resources Management.* Vol. 17, no. 3, June, 2003, pp. 197-222.
- BUCHBERGER, S. y WU, L. A model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulics Engineering.* ASCE. Vol. 121, no. 3, 1995, pp. 232-246.
- BUCHBERGER, S.G., CARTER, J.T., LEE, Y. and SCHADE, T.G. *Random Demands, Travel Times, and Water Quality in Deadends.* Denver: AWWA Research Foundation, 2003.
- ENTEKHABI, D. and BRAS, R. Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Barlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall. *Journal of Geophysical Research.* Vol. 95, no. D3, February, 1990, pp. 2093-2100.
- FELICIANO, D. *Análisis y caracterización estocástica del consumo de agua potable en viviendas de Culiacán, Sinaloa.* Tesis de Maestría. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- GUERCIO, R., MAGINI, R. and PALLAVICINI, I. Instantaneous residential water demand as stochastic point process. *Water Resources Management.* Brebbia et al. (editors). Southampton, UK: WIT Press, 2001, pp. 129-138.
- HERNÁNDEZ, D. *Pronóstico de la demanda de agua potable, empleando Neyman-Scott.* Tesis de Maestría. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2009, 281 pp.
- JBS ASSOCIATES INC. *Reporte de la empresa entregado a la Gerencia de Operación de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC).* Culiacán, México: JBS Associates Inc., 2000.

- JBS ASSOCIATES INC. *Reporte de la empresa entregado a la Gerencia de Operación de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC)*. Culiacán, México: JBS Associates Inc., 2001.
- KIYA, F. and MURAKAWA, S. *Design Load for Water Supply in Buildings*. Tokyo: A.A. Balkema/Rotterdam, 1989.
- NADIMPALLI, G. and BUCHBERGER, S. *Estimation of Parameters for Poisson Pulse Model of Residential Water Demands*. Technical report. Cincinnati: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, August, 2003, 43 pp.
- NEYMAN, J. and SCOTT, E. L. A statistical approach to problems of cosmology. *J. Royal Stat. Soc., Ser. B*. Vol. 20, 1958, pp. 1-43.
- MELLOR, D. *Generalized Neyman-Scott Model, Version 3.3.1 beta*. Cambridge: GNU (General Public License), Copyright 1989, 1991 Free Software Foundation Inc., 2007.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I., GUPTA, V. and WAYMIRE, E. Scale considerations in the modeling of temporal rainfall. *Water Resources Research*. Vol. 20, no. 11, 1984, pp. 1611-1619.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I., COX, D. and ISHAM, V. Some models for rainfall based on stochastic point process. *Proc. R. Soc. London*. Vol. A 410, 1987, pp. 269-288.
- TODINI, E., and PILATI, S. *A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Computer Applications in Water Supply: Volume 1-Systems Analysis and Simulation*. Coulbeck, B. and Orr, C.H. (editors). Tauton, UK: John Wiley and Sons, 1988, pp. 1-20.
- TZATCHKOV, V., ALCOCER-YAMANAKA, V. y ARREGUÍN, F.I. Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XIX, núm. 1, enero-marzo de 2004, pp. 41-51.
- TZATCHKOV, V., ALCOCER-YAMANAKA, V., ARREGUÍN, F.I. y FELICIANO, D. Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XX, no.1, enero-marzo de 2005, pp. 67-76.
- TZATCHKOV, V. *Datos básicos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Tercera edición. México, D.F.: Subdirección General e Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2007, 89 pp.

Abstract

ARREGUÍN, F.I., ALCO CER-YAMANAKA, V.H. & HERNÁNDEZ-PADRÓN, D.S. *Modeling of drinking water distribution networks using deterministic and stochastic approaches*. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. I, No. 4, October-December, 2010, pp. 119-136.

Home water consumption is one of the most difficult parameters to estimate while modeling drinking water distribution networks. It has been shown that this parameter follows a stochastic process, and that it is possible to characterize it with rectangular pulses—having a certain intensity, duration, and adherence to an arrival frequency—using stochastic models, such as the Neyman-Scott Rectangular Pulses Model (NSRPM). This model is based on the solution of a nonlinear optimization problem involving theoretical moments that represent the synthetic (equiprobable) series, and observed moments (in-field measurements) that statistically establish the measured series. The methodology and the initial validation of the process applied to home consumption have been published; however its validation in an actual distribution network has not been made, nor has it been compared with conventional methods. This paper compares the results obtained by using simulations of synthetic series which are stochastic in nature, product of the NSRPM model applied to the determination of pressures, flows, and leaks, with those obtained with the traditional method that uses demand time-variation curves and with pressure and flow measurements made in the Humaya sector, in Culiacán, Sinaloa, Mexico.

Keywords: modeling, water distribution networks, demand.

Dirección institucional de los autores

Dr. Felipe I. Arreguín

Subdirector General Técnico
Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur 2416, piso 8, colonia Copilco el Bajo
04340 México, D.F., México
Teléfonos: +52 (55) 5174 4401 y 5174 4400, extensión 1620
Fax: +52 (55) 5174 4402
felipe.arreguin@conagua.gob.mx

Dr. Víctor H. Alcocer-Yamanaka

Subcoordinador de Hidráulica Urbana
Coordinación de Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfonos: + 52 (777) 3293 600 y 3293 600, extensión 816
fax: + 52 (777) 3293 678
yamanaka@tlaloc.imta.mx

M.I. Dante S. Hernández-Padrón

Universidad Nacional Autónoma de México
Campus Morelos
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfono: + 52 (777) 3293 600, extensión 134
dante_hp27@yahoo.com.mx