

## Análisis de las causas que originan el suministro de agua intermitente, caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia)

Analysis of intermittent water supply causes, case study: southern part of Oruro city (Bolivia)

Amilkar Ernesto Ilaya-Ayza\*\*<sup>o</sup>, Rafael Pérez-García<sup>^</sup>, Carlos Martins\*, Joaquín Izquierdo\*, Enrique Campbell\*\*\*

### RESUMEN

Generalmente, los sistemas con suministro intermitente son diseñados para trabajar inicialmente bajo suministro continuo. Sin embargo, por diversas causas las empresas de agua adoptan el suministro intermitente. En el presente artículo se analiza este proceso de transición, de suministro continuo a intermitente. En el primer caso de estudio se evalúa la presencia de nodos favorables y nodos desfavorables en una red con suministro intermitente; esta clasificación permite comprender la inequidad en la entrega de agua y las causas de su falta en los nodos desfavorables, situación que puede ser interpretada de modo erróneo como escasez física de agua. En el segundo caso de estudio se reconstruyen las etapas de ampliación de la red del subsistema sur de Oruro, con base en las cuales se calcula la capacidad de la red y el requerimiento de agua de la población; ambos valores son comparados para establecer la etapa desde la cual el suministro es intermitente.

### ABSTRACT

Usually, intermittent water supply systems were initially designed to work continuously. However, water companies are bound by many reasons to adopt an intermittent supply. In this article, we analyse transition process from a continuous water supply to intermittent water supply. In the first study case, we evaluate presence of favourable nodes and unfavourable nodes in an intermittent supply network. This classification allows us to understand water delivery inequality and reasons of a lack of water in unfavourable nodes, which may be understood wrongly as a physical water scarcity. In the second study case, we reconstruct development steps of subsystem network in southern part of Oruro city. Based on these steps, we calculate network capacity and water demand of population. We compare both values in order to find out when supply became intermittent.

Recibido: 7 de octubre de 2015  
Aceptado: 13 de octubre de 2016

#### Palabras clave:

Suministro intermitente; capacidad de la red; curva de consigna; demanda dependiente de la presión; ampliación de la red.

#### Keywords:

Intermittent water supply; network capacity; setting curve; pressure dependent demand; network extension.

#### Cómo citar:

Ilaya-Ayza, A. E., Pérez-García, R., Martins, C., Izquierdo, J., & Campbell, E. (2016). Análisis de las causas que originan el suministro de agua intermitente, caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia). *Acta Universitaria*, 26(NE-3), 64-73. doi: 10.15174/au.2016.1027

### INTRODUCCIÓN

Cuando se realiza la ampliación en extensión de una red de suministro de agua, el objetivo es llegar con el servicio a un mayor número de personas. Sin embargo, cuando esta ampliación no toma en cuenta la capacidad de la red actual y la influencia de las nuevas extensiones, se puede llegar a escenarios que tienden a reducir la capacidad de la red, lo cual amenaza la cantidad y la calidad del servicio. Este tipo de condiciones pueden obligar a suministrar agua de forma intermitente.

Se considera suministro de agua intermitente cuando el abastecimiento del servicio se realiza por una cantidad limitada de tiempo y cuando la periodicidad con que se abastece es diaria, aunque en los casos extremos alcanza a más de un día. Paradójicamente, este tipo de suministro requiere mucha más agua que los sistemas continuos, 24 h los siete días de la semana, debido a los niveles altos de desperdicio (Faure & Pandit, 2010).

\* FIULNG-IMM, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, Edificio 5C, Valencia, España, C.P. 46022. Correos electrónicos: carlos.martins.a@gmail.com; jizquier@upv.es

\*\* Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Ciudad Universitaria s/n, Oruro, Bolivia. Correo electrónico: amilay@upv.es

\*\*\* Berliner Wasserbetriebe. Ciserer Straße 40, 10107 Berlin, Germany. Correo electrónico: enrique.campbell@bwb.de

<sup>o</sup> Autor de correspondencia.

<sup>^</sup> In memoriam: Rafael Pérez-García

Según el informe *Benchmarking* Internacional de redes de agua y saneamiento del Banco Mundial (Van den Berg & Danilenko, 2011), solamente el 16% de las empresas de agua en los países en vías de desarrollo cumplieron con el abastecimiento de 24 h, en promedio se tiene un servicio por 16 h al día. Se estima que una tercera parte de África y Latinoamérica, y más de la mitad de la población de Asia, tiene suministro intermitente.

Generalmente, este tipo de sistemas están diseñados y construidos para trabajar con suministro continuo; sin embargo, son varias las razones para que el suministro se realice de forma intermitente y que en varias horas del día la tubería se encuentre vacía con presencia de aire. Totsuka, Trifunovic & Vairavamoorthy (2004) clasifican estas causas en *escasez física del recurso, escasez económica y mala gestión*.

En el presente trabajo se evalúa el crecimiento del subsistema de la zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia), el cual fue construido para tener suministro continuo, pero las modificaciones en la red impusieron un entorno ideal para un suministro intermitente. Con base en la clasificación de sistemas intermitentes (Totsuka *et al.*, 2004), el sistema solo presenta escasez económica y de gestión, no escasez física del recurso; de esta forma, únicamente se analiza la influencia de las modificaciones en la infraestructura a lo largo del periodo de estudio.

Con base en el crecimiento histórico de la población de Oruro, su crecimiento urbano y la infraestructura para el servicio de agua potable existente desde 1968, se reconstruirán las condiciones de servicio para cada una de las etapas de ampliación, con lo cual se analizarán las condiciones que llevaron al suministro intermitente.

Para complementar el presente trabajo y tener una mejor comprensión del proceso de transición de suministro continuo a intermitente, se estudia también la presencia de nodos favorables y desfavorables en una red que cuenta con la presencia de depósitos domiciliarios, analizándola bajo el criterio de demanda dependiente de la presión.

## METODOLOGÍA

El primer caso de estudio permite analizar y clasificar los nodos de la red que tiene depósitos domiciliarios en nodos favorables y nodos desfavorables. Esta situación es regida por la dependencia de la demanda con la presión, es decir, que el caudal suministrado dependerá de la presión disponible en la red, a niveles de presión

elevados se puede lograr abastecer con el caudal demandado y con valores bajos de presión se tiene un suministro limitado o incluso un caudal nulo.

Generalmente, el análisis de redes de suministro de agua se realiza basado en la demanda, independiente de la presión (*Demand Driven Analysis* [DDA]); no obstante, un análisis más cercano a la realidad debe estar basado en la demanda dependiente de la presión (*Pressure Dependent Demand* [PDD]) (Cheung, Van Zyl & Reis, 2005; Wu *et al.*, 2006), principalmente cuando existen depósitos domiciliarios en la red. La relación de demanda dependiente de la presión está definida por una función exponencial y un tramo lineal (figura 1) (Cheung *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2006):

$$\begin{aligned}
 &0 && H_i \leq 0 \\
 &\frac{Q_i^s}{Q_{ri}} = \left(\frac{H_i}{H_{ri}}\right)^\alpha && 0 < H_i < H_t \\
 &\left(\frac{H_i}{H_{ri}}\right)^\alpha && H_i \geq H_t
 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde la demanda calculada ( $Q_i^s$ ) en el nodo  $i$  o caudal de suministro depende de la demanda de referencia o demanda solicitada por el nodo ( $Q_{ri}$ ), la presión calculada en el nodo ( $H_i$ ) y la presión de referencia que se considere para abastecer la demanda total solicitada ( $H_{ri}$ ), en una relación con exponente  $\alpha$ . Cuando la presión calculada en el nodo es superior a un umbral de presión ( $H_t$ ), se asume un comportamiento lineal.

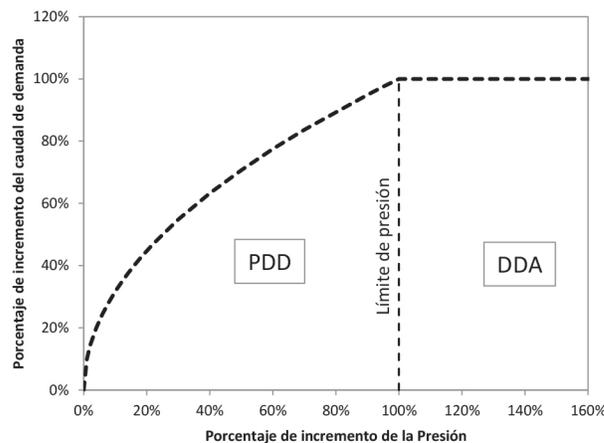
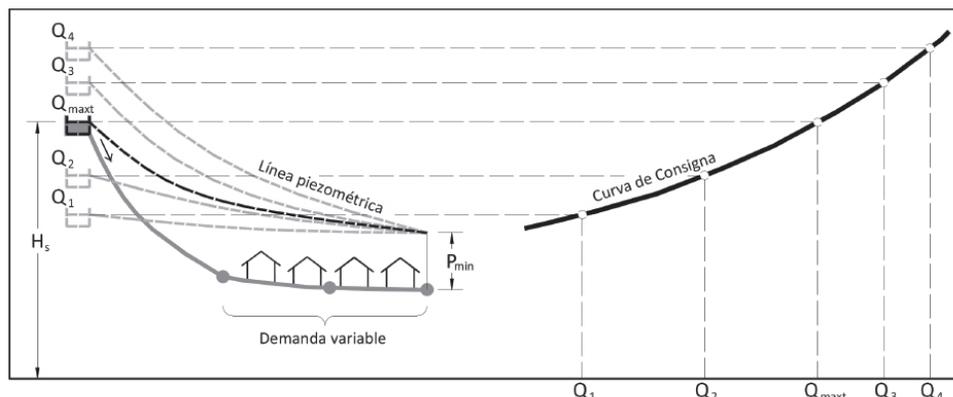


Figura 1. Curva típica de la demanda dependiente de la presión (PDD). Fuente: Adaptado de Wu *et al.* (2006).



**Figura 2.** Representación de la curva de consigna y el caudal máximo teórico.  
Fuente: Elaboración propia.

El cálculo hidráulico para cada estado de carga es realizado con EPANET 2.0, modificado para PDD (Pathirana, 2010), el cual permite realizar la simulación con base en la demanda dependiente de la presión. Los caudales demandados o estados de carga son incrementados progresivamente, por lo que se tienen varios puntos de caudal suministrado y presión en cada uno de los nodos. La pendiente de la curva de cada uno de los nodos establece si el mismo es clasificado como nodo favorable o nodo desfavorable.

Con el segundo caso de estudio se busca reconstruir las condiciones hidráulicas del subsistema de la zona sur de la ciudad de Oruro, en el periodo comprendido de entre 1968 a 2013. El modelo utilizado es el actual. Se considera que la red inicial se mantiene desde la inauguración de la infraestructura. Debido a la inexistencia de información, se utiliza como referencia el crecimiento de la mancha urbana, para la cual se estima la topología de la red de suministro en cada uno de los periodos de estudio.

Si se toma como referencia la población de cada uno de los periodos estudiados y la demanda de agua, es posible calcular el caudal requerido por la población. Sin embargo, para comparar este valor con la capacidad de la red es necesario que ambos elementos tengan las mismas dimensiones, por lo que se propone el uso del indicador *Caudal máximo teórico*.

### Caudal máximo teórico ( $Q_{maxt}$ )

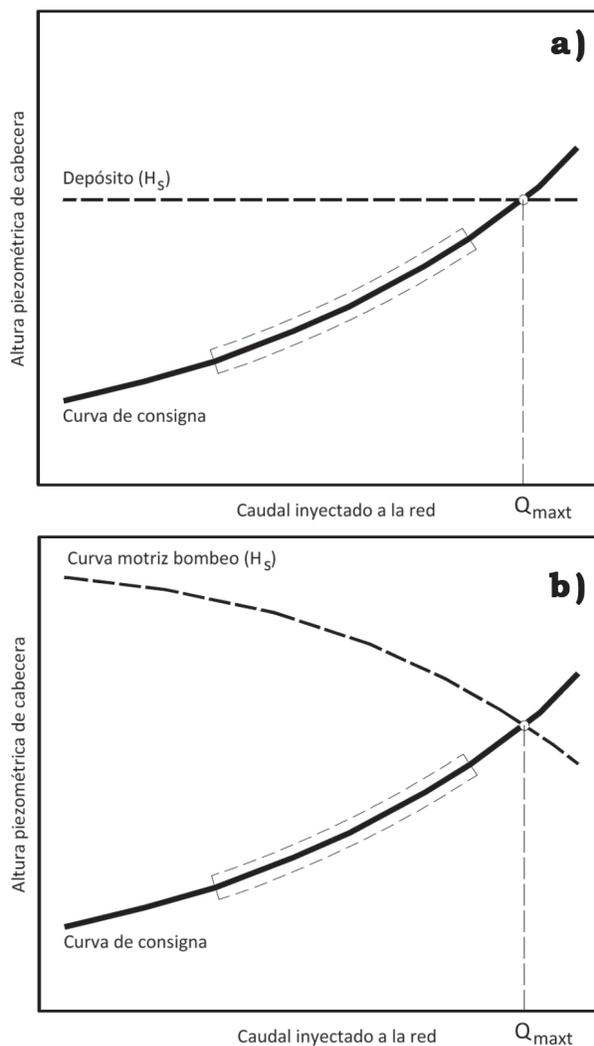
La curva característica del sistema es un elemento bastante utilizado en el dimensionamiento de sistemas de bombeo (Bosserman, 1999). Una red de suministro

de agua no tiene una curva característica definida, pues esta depende de la pérdida de energía que puedan generar los usuarios en los puntos de toma de agua, en horas punta y en horas valle (Martínez, Vidal & Andrés, 2009; Shammas & Wang, 2015).

Si en lugar de esperar que los usuarios de la red generen la pérdida de energía a través de su consumo y la manipulación de las tomas de agua, se regula la altura piezométrica o presión de ingreso en la fuente de suministro con el fin de llegar a los puntos de consumo con la presión mínima necesaria, se lograría reducir esta pérdida de energía. De esta forma se obtendría no una altura piezométrica o presión de consigna, sino una curva de consigna que asegure para cada caudal demandado o estado de carga de la red la presión mínima estrictamente necesaria en los puntos de consumo (Martínez *et al.*, 2009) (figura 2).

Al igual que en una tubería simple, es posible calcular el caudal máximo que circula por la misma con base en las condiciones de contorno aguas arriba y abajo, como presiones o alturas manométricas, en una red puede hacerse lo mismo. La curva de consigna (Martínez *et al.*, 2009) permite fijar las condiciones aguas abajo o en los nodos de consumo de la red, definiéndose una presión mínima ( $P_{min}$ ). La condición aguas arriba, que limita las posibilidades hidráulicas de la red, está definida por la energía disponible en el punto de suministro ( $H_s$ ), puede ser la curva motriz de un depósito o de una bomba. Gráficamente, el caudal máximo teórico es el resultado de la intersección de la curva de consigna y la curva motriz de la fuente de suministro (figura 3).

$$Q_{maxt} = f(P_{min}, H_s) \quad (2)$$



**Figura 3.** Caudal máximo teórico; a) para una red alimentada por un depósito, b) para una red alimentada por equipos de bombeo.  
 Fuente: Elaboración propia.

En sistemas alimentados por depósitos, el caudal máximo teórico puede incrementarse solamente con mejoras, ampliaciones y refuerzos en la red, pues la energía disponible de ingreso presenta poca variación, la que le facilita la altura del depósito, por lo que no es posible el incremento con modificaciones en la misma fuente, a menos de que se construya un nuevo depósito que permita disponer de una mayor cota piezométrica.

En los sistemas de suministro alimentados directamente por bombeo existen dos opciones para ampliar el caudal máximo teórico: la primera implica mejoras, ampliaciones o refuerzos de la red, que modificará la

pendiente de la curva de consigna; y la segunda forma será mejorando el equipo de bombeo, la nueva curva de bombeo con caudales y alturas manométricas mayores alcanzará un valor del caudal máximo teórico más grande.

Por lo general, el concepto de *capacidad de la red* es considerado un elemento cualitativo de la red, el cual puede ser identificado mediante la reducción de presiones y las quejas de la población (Alegre *et al.*, 2006). El planteamiento de un indicador como el caudal máximo teórico permite otorgarle su verdadera dimensión, le otorga el carácter cuantitativo necesario para la toma de decisiones en la evaluación, gestión, mantenimiento, explotación y diseño de una red de agua potable.

### Caudal máximo requerido ( $Q_{maxr}$ )

El caudal máximo requerido es calculado con base en la demanda de la población, incluyendo pérdidas o fugas y otros usos o necesidades de agua que no están incluidas en la demanda.

En un sistema con suministro continuo, el caudal máximo requerido corresponde al caudal máximo horario.

$$Q_{maxr} = k_p \cdot \frac{Pob \cdot D}{86400}, \quad (3)$$

donde:

$Q_{maxr}$  = caudal máximo requerido, en l/s

$k_p$  = factor de punta, adimensional

$Pob$  = población, en hab.

$D$  = dotación, en l/hab-día

En sistemas con suministro intermitente este caudal dependerá de los volúmenes de suministro por sector y los horarios de entrega de agua.

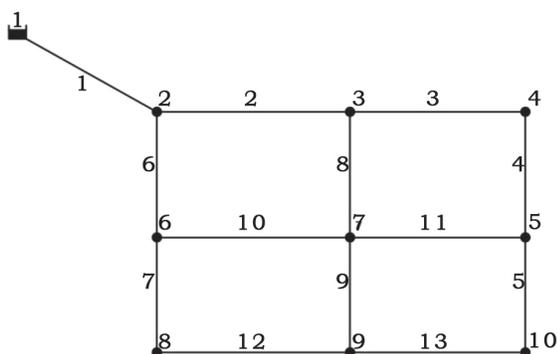
### La capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente

La capacidad de la red es un elemento clave para el diagnóstico de un sistema con suministro intermitente. Una red de suministro debe ser capaz de transportar el caudal demandado o requerido por la población, otorgando la suficiente presión de servicio en cada uno de los nodos. Por lo tanto, siempre que el caudal máximo teórico sea superior al caudal máximo requerido se cumplirá esta condición.

**Tabla 1.** Relación entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido y sus implicancias en el tipo de suministro.

Caudal máximo teórico y caudal máximo requerido	Observaciones referentes al tipo de suministro
$Q_{maxt} \gg Q_{maxr}$	La red está sobredimensionada, las presiones de suministro son muy grandes. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente permite el abastecimiento simultáneo sin la necesidad de sectorización.
$Q_{maxt} > Q_{maxr}$	La red trabaja de forma adecuada, las presiones de suministro son mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{maxt} = Q_{maxr}$	La red trabaja de forma óptima, las presiones de suministro son iguales o mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{maxt} < Q_{maxr}$	La red puede trabajar con suministro continuo, pero de forma deficiente, las presiones de suministro son menores a las demandadas. Existe el riesgo de tener suministro intermitente. Para que siga su trabajo con suministro continuo, con presiones adecuadas, requiere la ampliación de su capacidad.
$Q_{maxt} \ll Q_{maxr}$	La red no puede trabajar con suministro continuo, por lo que se recurre al suministro intermitente, se obtienen presiones negativas en el modelo matemático de la red cuando se calcula en DDA. Para que trabaje con suministro continuo requiere la ampliación de la capacidad de la red.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Red modelo para el análisis de la demanda dependiente de la presión.  
Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el funcionamiento de una red, tanto si tiene suministro intermitente como si tiene suministro continuo, debe relacionarse el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en suministro continuo. De esta forma es posible identificar las deficiencias en capacidad de la red, lo cual puede traducirse en un suministro continuo con presiones muy bajas o en suministro intermitente (tabla 1).

## RESULTADOS

### Caso de estudio 1. Nodos favorables y desfavorables en una red

La red modelo mostrada en la figura 4 y detallada en la tabla 2 es utilizada para analizar la diferencia entre nodos favorables y desfavorables. Se considera una demanda igual en todos los nodos con el fin de facilitar la evaluación de las variaciones en el caudal suministrado a partir de este patrón; asimismo, todos los nodos en la red se encuentran en un mismo nivel y el desnivel entre el plano de los nodos y el depósito es de 50 m (tabla 3).

Para el análisis PDD se adopta un umbral de presión  $H_t = 50$  m; el exponente de la relación demanda/presión es  $\alpha = 0.5$ . Con el fin de comparación, se realizó el cálculo en DDA y en PDD.

En la figura 5 se muestra la variación del caudal suministrado con la presión en cada uno de los nodos de la red, para diferentes estados de carga que van incrementando el caudal demandado.

**Tabla 2.** Características de las tuberías de la red.

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	432	300
2	250	200
3	250	200
4	250	200
5	250	200
6	250	200
7	250	200
8	250	200
9	250	200
10	250	200
11	320	250
12	250	200
13	250	200

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.**  
Características de los nodos de la red.

Nodo	Cota (m)
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
1	50

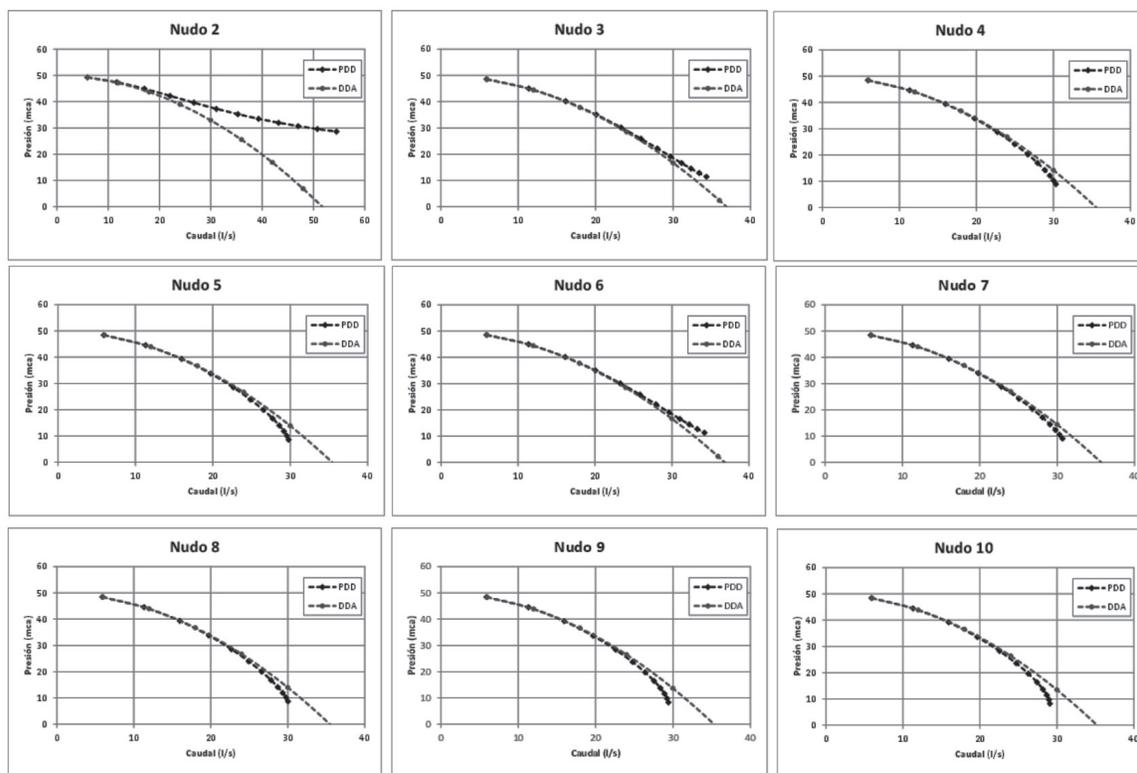
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la posición del nodo en la red es muy determinante para recibir el caudal demandado; aquellos nodos que cuentan con mayor presión de servicio, ubicados en zonas favorables (nodos 2, 3 y 6) pueden incrementar su demanda sin problemas, pues la red no restringe, por sí sola, el suministro, lo

cual, sin duda, perjudica a los demás nodos (nodos 4, 5, 7, 8, 9 y 10) y limita su caudal de suministro. Entre estos nodos desfavorables existe un caudal máximo de suministro que no puede ser superado, debido a las restricciones que imponen los consumos y la misma configuración de la red; muchas veces este caudal es menor al requerido por los usuarios.

En este tipo de escenarios, la presencia de depósitos domiciliarios genera competencia entre usuarios, cuyo objetivo es recolectar la mayor cantidad de agua posible en el menor tiempo técnicamente posible (Fontanazza, Freni, La Loggia, Notaro & Puleo, 2013), agravando la situación de los usuarios ubicados en nudos desfavorables.

Al comparar los caudales demandados en un escenario PDD con los valores DDA es posible ver cómo el caudal y la presión en PDD siguen a la curva DDA hasta que los nodos desfavorables pierden presión y disponen de menor caudal, la reducción del caudal permite la reducción de la pérdida de carga en tramos aguas arriba y, en consecuencia, se dispone de mayor presión para los nodos favorables.



**Figura 5.** Presión y caudal suministrado en cada nodo en DDA y PDD para  $H_i = 50$  m.c.a.  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.**  
Población total de la ciudad de Oruro.

Año	1950	1976	1992	2001	2012
<b>Población área urbana</b>	73 094	158 615	222 018	236 110	264 943

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE) (2015).

**Tabla 5.**  
Cálculo del caudal máximo requerido.

Año	1968	1972	1985	2007	2013
<b>Población subsistema zona sur</b>	13842	16814	33407	37395	37700
<b>Caudal máximo requerido (l/s)</b>	29.72	36.10	71.73	80.29	80.94

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Crecimiento urbano de Oruro  
Fuente: Martinelly (2009).

Es característico de los nodos favorables que la pendiente de la curva de suministro sea menor a la pendiente de la curva definida por DDA. Esta situación favorece sus posibilidades de obtener mayor caudal de suministro por la red, en casos en los que no existe medición se dan las condiciones ideales para el derroche de agua. Por el contrario, los nodos desfavorables tienen una curva de suministro que cae con mayor pendiente, lo cual tiende a limitar su caudal de suministro. Usualmente, las quejas de la población debidas a la falta de presión y agua provienen de este tipo de nodos. Es común, cuando no existe control

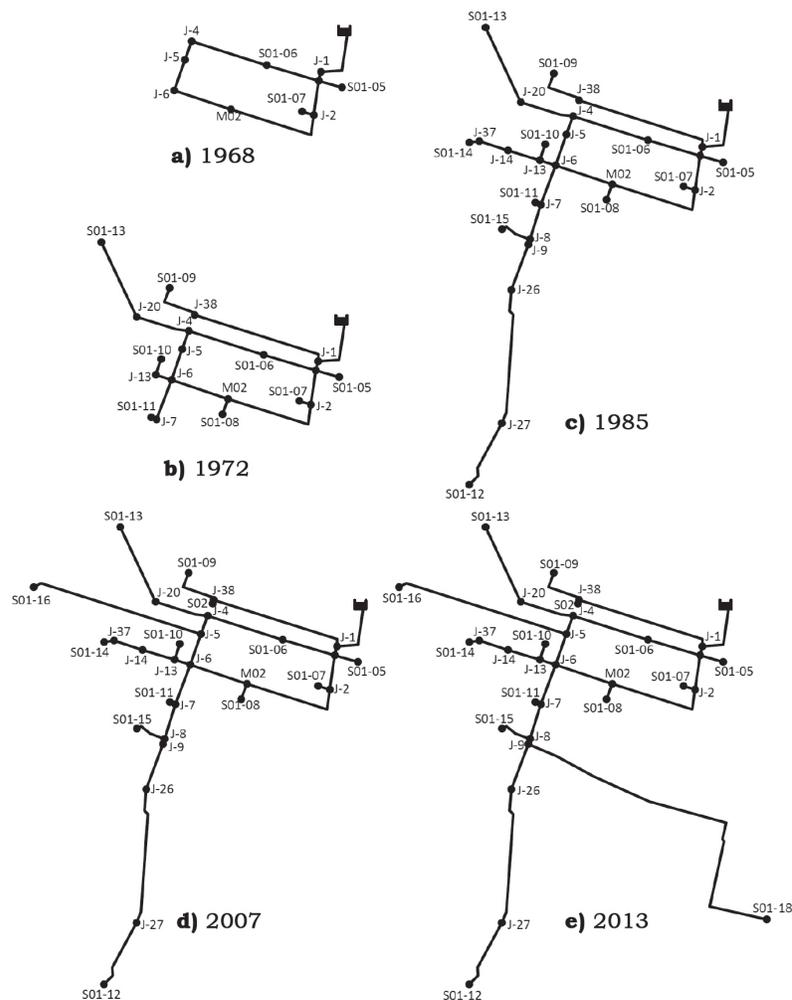
de los caudales, asumir esta falta de agua debida a las restricciones de la red como escasez física del recurso. Una percepción que puede dar origen a decisiones equivocadas en la gestión del sistema, como optar por el suministro intermitente.

### Caso de estudio 2. El origen del suministro intermitente en la zona sur de Oruro

En 1968 se inauguró el proyecto “Agua potable para la ciudad de Oruro” (Asociación Nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado [ANESAPA], 2014), el cual incluía la infraestructura principal para el suministro de agua en el subsistema de la zona sur de la ciudad, depósito y tuberías principales. Por esta razón, 1968 es el año inicial para el análisis. El crecimiento de la población de la ciudad de Oruro es detallado en la tabla 4, con base en los datos de censos poblacionales.

La ciudad fue creciendo en extensión (figura 6) y población, consecuentemente lo hacía la red de distribución a través de la extensión de redes principales y secundarias.

Si se considera el tamaño del área urbana, la densidad poblacional y la cantidad de usuarios actual, es posible estimar la población (*Pob*) de la zona de estudio en cada uno de los periodos conocidos de crecimiento, definidos por el crecimiento urbano. Asimismo, con base en la dotación media actual del subsistema (84.32 l/hab/d) y un factor pico ( $k_p$ ) de 2.2, valor calculado en otras zonas de la ciudad que cuentan con agua potable durante 24 h, se calcula el requerimiento de caudal máximo horario en cada uno de los años de estudio (tabla 5).



**Figura 7.** Crecimiento de la red del subsistema sur de la ciudad de Oruro.  
 Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento de la ciudad contribuye a definir los escenarios de ampliación de la red de suministro del subsistema de la zona sur de la ciudad de Oruro, tuberías principales e ingreso a sectores (figura 7).

Con la configuración de la red para cada año de estudio se calcula la curva de consigna y el caudal máximo teórico o capacidad de la red respectiva para una presión mínima en los nodos  $P_{min} = 20$  m.c.a (tabla 6). La elevación mínima del nivel de agua en el depósito  $H_s = 3771$  msnm y la elevación promedio de la red es 3723.8 msnm (figura 8).

Los resultados nos ayudan a comparar el caudal requerido por la población y el caudal máximo teórico o capacidad de la red (figura 9).

El sistema estudiado nace para suministro continuo. Esta situación es evidente, pues la capacidad de la red es superior al caudal máximo requerido por la población en 1968, la red podía suministrar agua a mayor cantidad de población, pues el diseño inicial así lo permite y otorga una holgura razonable para futuras ampliaciones. Este escenario se mantiene durante todo el primer periodo 1968-1972; las ampliaciones realizadas en este periodo son desarrolladas en zonas favorables, lo que repercute en la ampliación de la capacidad de la red, la red se desarrolla de forma adecuada.

En el periodo 1972-1985, la situación es diferente, la zona sur de la ciudad de Oruro crece en mayor proporción al resto de la ciudad y las extensiones de la red para cubrir los nuevos sectores son de gran longi-

tud, la elección de diámetros pequeños incrementa la pérdida de carga y, en consecuencia, la capacidad de la red tiende a reducirse.

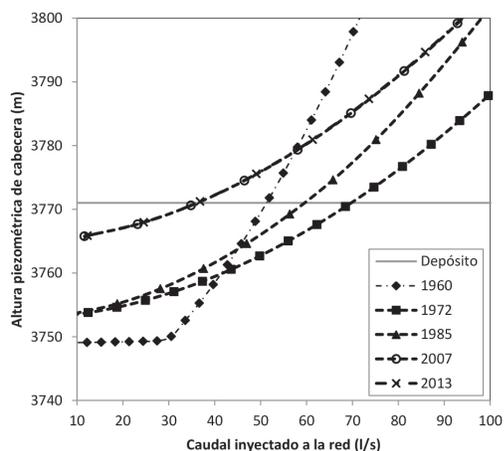


Figura 8. Curva de consigna en cada uno de los años de estudio. Fuente: Elaboración propia.

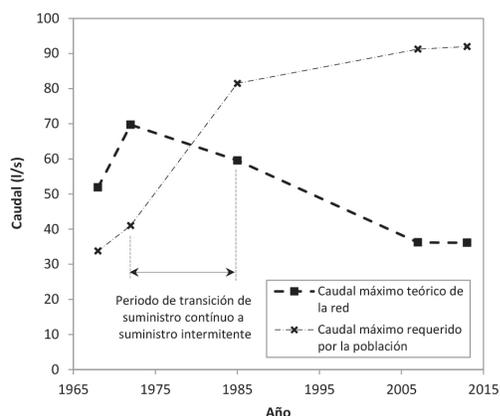


Figura 9. Evolución del caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Cálculo del caudal máximo teórico.

Año	Caudal máximo teórico (l/s) a $P_{min} = 20$ m.c.a.
1968	51.88
1972	69.72
1985	59.56
2007	36.21
2013	36.12

Fuente: Elaboración propia.

En 1985, el caudal máximo requerido por la población supera al caudal máximo teórico, imponiendo la reducción de las presiones en la red, los nodos desfavorables pueden quedarse sin agua en periodos de máximo consumo, la gente necesita proteger su suministro y opta por el uso de depósitos domiciliarios. Este escenario genera inequidad en el suministro, los nodos favorables derrochan agua debido a una medición inexistente y los usuarios ubicados en zonas desfavorables se quejan por la falta de agua; se impone entre la población y el operador una percepción de escasez física de agua, a la que debe buscarse una solución.

Para resolver la escasez de agua en los puntos desfavorables existen dos soluciones potenciales: la primera opción, aunque no muy evidente en escenarios de escasez económica y gestión deficiente, es la ampliación de la capacidad de la red, renovando y/o reforzando tramos principales; y la segunda opción, generalizada por la idea errónea de la falta de agua y por la escasez económica del sistema, es optar por el suministro intermitente.

La adopción del suministro intermitente limita las horas de suministro en diferentes zonas, impone horarios que buscan reducir el caudal máximo. Esta acción puede ser útil inicialmente, pues los tramos principales deben conducir caudales menores, en consecuencia llega el caudal suficiente a los puntos desfavorables; sin embargo, el crecimiento poblacional exigirá nuevas extensiones, continuar con estas acciones condena al sistema a la intermitencia en el suministro de agua.

En este segundo periodo se cruzan las curvas del caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido, existe un punto en el cual la capacidad de la red ya no cubre la demanda de la población, desde esa fecha la relación se mantiene. Por ello, se puede afirmar que el suministro intermitente en la zona sur de la ciudad de Oruro comenzó entre 1972 a 1985.

En el tercer periodo de estudio 1985-2007 se consolida el suministro intermitente, pues las nuevas ampliaciones siguen reduciendo la capacidad de la red, la ampliación para el sector S01-16 es de diámetro pequeño y alimenta a un punto de mayor elevación. Estas características lo convierten en nodo crítico, condicionando la curva de consigna y, como consecuencia, al valor del caudal máximo teórico.

Entre 2007 y 2013, el subsistema se amplía con el sector S01-18, lo cual resulta no ser determinante en la capacidad de la red, debido a que el sector se encuentra en un sector más bajo y el diámetro instalado

es adecuado para las necesidades del mismo; resulta ser una buena ampliación, pues no afecta en demasía a la curva de consigna ni al caudal máximo teórico.

El problema de la reducción de la capacidad de la red no es percibido cuando la red trabaja con suministro intermitente debido a que se logra llegar con agua, aunque con presiones muy bajas, a todos los sectores; no obstante, este problema será el principal responsable del suministro inequitativo.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo propone el uso del caudal máximo teórico como herramienta para establecer la capacidad hidráulica de la red. A partir del cual es posible evaluar el funcionamiento de un sistema de suministro de agua para prever situaciones que lleven a sistemas con suministro continuo a suministro intermitente.

Asimismo, se plantea una forma de clasificación entre nodos favorables y nodos desfavorables en modelos de demanda dependiente de presión, causantes de la inequidad en el suministro de agua en sistemas intermitentes. Este enfoque facilita apreciar cómo los nudos desfavorables pueden tener limitaciones en el caudal de suministro impuestas por la misma red.

Con ambos casos de estudio es posible observar cómo los procesos de ampliación de la red redujeron sistemáticamente la capacidad de la red. Esta reducción trajo consigo inicialmente presiones bajas, las cuales generaron la presencia de nodos desfavorables y quejas de la población, percibiendo esta situación como escasez física de agua y no como reducción de la capacidad de la red, con lo cual se decidió optar por el suministro intermitente; las acciones de ampliación posteriores consolidaron este tipo de suministro.

Es importante considerar que la extensión racional de la red no solo implica el tendido de tuberías adicionales que lleguen a los puntos de demanda, este proceso debe ir acompañado del refuerzo, de la rehabilitación o ampliación de las tuberías principales de la red.

## REFERENCIAS

- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2006). *Performance indicators for water supply services*. IWA publishing.
- Asociación Nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado (ANESAPA). (2014). *SeLA – Oruro 50 años de servicio*. Bolivia: ANESAPA. Recuperado el 18 de marzo de 2015 de <http://www.anesapa.org/noticias/sela-oruro-50-anos-de-servicio/>
- Bosserman, B. E. (1999). Pump system hydraulic design. En L. W. Mays, *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill Professional Publishing.
- Cheung, P. B., Van Zyl, J. E., & Reis, L. F. (Septiembre, 2005). Extension of EPANET for Pressure Driven Demand modeling in water distribution system. *Computer and Control in Water Industry, Water Management for the 21st Century*.
- Faure, F., & Pandit, M. (2010). *Intermittent Water Distribution*. Recuperado el 21 de enero de 2015 de Sustainable Sanitation and Water Management de <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-distribution/hardware/water-distribution-networks/intermittent-w>
- Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Notaro, V., & Puleo, V. (2013). Evaluation of the Water Scarcity Energy Cost for Users. *Energies*, 6(1), 220-234.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2015). *Población por censos según departamento, área geográfica y sexo, censos de 1950-1976, 1992-2001*. Bolivia: INE. Recuperado el 20 de marzo de 2015 de <http://www.ine.gob.bo/indice/visualizador.aspx?ah=PC20111.HTM>
- Martinelly, E. (2009). *Proyecto Cábala - Procesos de integración sociocultural y económica en ciudades capitales de Bolivia*. Recuperado el 18 de marzo de 2015 de <http://www.pieb.org/cabala/principal.html>
- Martínez, F., Vidal, R., & Andrés, M. (2009). La regulación de los sistemas hidráulicos. En E. Cabrera, V. Espert, J. García-Serra & F. Martínez, *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua* (3ª ed., vol. II). Valencia, España: ITA-Universidad Politécnica de Valencia.
- Pathirana, A. (2010). EPANET2 Desktop Application for Pressure Driven Demand Modeling. *Water Distribution Systems Analysis. Water Distribution System Analysis 2010 - WDSA2010* (pp. 65-74). Tuscon, AZ, USA.
- Shammas, N. K., & Wang, L. K. (2015). *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Totsuka, N., Trifunovic, N., & Vairavamoorthy, K. (Octubre, 2004). Intermittent urban water supply under water starving situations. *30th WEDC International Conference* (pp. 505-512). Vientiane, Laos.
- Van den Berg, C., & Danilenko, A. (2011). *The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book*. Washington D.C.: The World Bank.
- Wu, Z. Y., Wang, R. H., Walski, T. M., Yung, S. Y., Bowdler, D., & Baggett, C. C. (Agosto, 2006). Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. *8º Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*. Cincinnati, Ohio.