

**EVALUACIÓN DE LAS INFILTRACIONES AL SISTEMA DE DRENAJE MEDIANTE ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL.
CASO DE ESTUDIO EN TEPIC, MÉXICO**

Gabriela ESPINOSA GUTIÉRREZ^{1*}, Paula MAREIKE EVERS¹, Ralf OTTERPOHL¹,
Juan Carlos PAREDES LIMAS², Rosa María ZAMBRANO CÁRDENAS² y
Liborio GONZÁLEZ TORRES²

¹ Institute of Wastewater Management and Water Protection, Hamburg University of Technology, Eißendorfer Straße 42 (M) 21073, Hamburgo, Alemania

² Área de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura “Amado Nervo”, Tepic, Nayarit, México, C.P. 63155

*Autor de correspondencia: gabriela.espinosa@tuhh.de

(Recibido diciembre 2013; aceptado septiembre 2014)

Palabras clave: red de alcantarillado, lluvia, dilución, nitrógeno, fósforo, muestreo, gestión de agua residual

RESUMEN

La infiltración de agua pluvial o agua subterránea al sistema de drenaje urbano es un fenómeno que puede afectar negativamente la capacidad conductiva de la red de drenaje por el aumento de volumen que genera. También puede propiciar cambios en la composición química del agua residual que ésta transporta por la dilución de sus componentes en un mayor volumen de agua. Las consecuencias en caso extremo tienen costos técnicos y económicos que incluyen por ejemplo el desbordamiento de las tuberías y problemas en la operación de las plantas de tratamiento. También es posible un incremento en la emisión de contaminantes sin tratamiento previo hacia el ambiente. La infiltración de agua al sistema de drenaje se determina convencionalmente mediante mediciones del flujo total en las tuberías que son comparadas con la cantidad de agua residual generada. La diferencia entre estos dos valores es igual al volumen total de agua de infiltración. Sin embargo, esta estrategia se vuelve impracticable cuando se desconoce la cantidad real de agua residual generada por falta de medidores de consumo o de medidores de flujo en las descargas, tal como en la ciudad de Tepic, Nayarit (Méjico). El presente estudio evalúa la infiltración en las tuberías del drenaje doméstico de la ciudad de Tepic en temporada de lluvia mediante una estrategia alternativa basada en la comparación de las concentraciones teóricas y reales de nitrógeno y fósforo en muestras de agua residual. Los resultados obtenidos indican que existe una dilución significativa de los contaminantes causada potencialmente por infiltraciones al drenaje. El factor de dilución del agua residual calculado en este estudio para diferentes puntos y días de muestreo fluctúa entre 30 y 500 % siendo los valores en su mayoría mayores al 50 %. Estos valores representan un problema potencial para la red sanitaria y para la eficiencia del tratamiento del agua residual en la ciudad que requiere medidas preventivas o correctivas en el sistema.

Key words: urban drainage system, rain, dilution, nitrogen, phosphorus, sampling, wastewater management

ABSTRACT

The infiltration of rain or groundwater into the sewer systems can negatively affect the hydraulic capacity of the sewer network as a consequence of the increment of the total volume of water. Furthermore, the composition of the wastewater in the pipelines may also be affected due to the dilution of its components in a larger volume. These effects may lead to important technical problems with an inherent economic cost. For instance, the overflow of the drain lines, operational problems at the wastewater treatment facilities, and an increase of pollutant emissions to the environment due to the lack of treatment. The evaluation of sewer infiltrations is a key factor in order to counteract these potential problems by means of preventive or corrective measures. Conventionally, the infiltration is assessed as the difference between the total flow of generated wastewater and the actual water flow in the pipelines. This strategy is not feasible when there are not flow measurement devices at the consumption or at the discharge points. This is the case in the city of Tepic, Nayarit in Mexico. In the present study, an alternative approach was used to evaluate the infiltrations into the domestic sewer in the city of Tepic during the rainy season. This approach is based on a comparative analysis of theoretical and measured nitrogen and phosphorus content in wastewater samples from the sewer. Evidence of high infiltration into the sewer was found. The dilution factor calculated for the wastewater at different locations and sampling days ranges from 30 to 500 %, indicating a potential problem for the sewer network and for the efficiency in the wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de drenaje en las ciudades pueden ser de dos tipos: mixtos o separados. Los sistemas mixtos recolectan el agua residual y el agua de lluvia en la misma red de tuberías. El sistema separado está compuesto por redes de tuberías para cada tipo de agua (red sanitaria y red pluvial) y no están interconectados (CONAGUA 2009). En ambos sistemas de drenaje existe la posibilidad de exfiltración del agua residual hacia el suelo y la posibilidad de infiltración de agua de diferentes fuentes hacia el drenaje.

La exfiltración tiene lugar cuando las tuberías del drenaje están dañadas y cuando su capacidad hidráulica es rebasada. En estos casos el agua residual se exfiltra hacia el suelo (Read y Vickridge 1997) lo cual representa un riesgo potencial de contaminación tanto para el suelo como para el agua subterránea (Hua 2007).

La infiltración puede tener diversos orígenes. En el caso de los drenajes mixtos, las infiltraciones provienen de agua subterránea, de fugas de agua potable y de descargas ilegales al drenaje. El agua de lluvia en los sistemas mixtos está considerada dentro de la planeación y por ende, no es considerada como infiltración. En el caso de los drenajes separados, la entrada de agua de lluvia a la red sanitaria se considera como una infiltración y se suma a los flujos mencionados anteriormente (Hennerkes 2006).

El trabajo de Hennerkes (2006) indica que el agua se puede infiltrar a las tuberías por rupturas y grietas. La edad y condición de las tuberías son factores que tienen una influencia importante en la infiltración: a mayor edad, mayor probabilidad de existencia de grietas. Además el agua también puede infiltrarse a través de conexiones no herméticas, conexiones con el drenaje pluvial y pozos de inspección mal cerrados o abandonados. Las infiltraciones son más críticas especialmente en temporada de lluvia. La experiencia muestra que después de una lluvia intensa, el agua puede elevar el nivel del manto freático e infiltrar las tuberías del drenaje hasta por un periodo de 20 días (Fischer 1991). Asimismo en sistemas como el de Tepic, los techos de las casas pueden estar directamente conectados al drenaje sanitario lo cual representa un afluente adicional directo.

Debido al aumento en el volumen total de agua, las infiltraciones al drenaje afectan la cantidad y composición química del agua residual que las tuberías transportan y que debe ser tratada por medio de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR). Los efectos negativos de las infiltraciones al drenaje tienen costos técnicos y económicos. Estos costos se derivan, por mencionar algunos casos, de la necesidad de incrementar el tamaño de los tanques de regulación, de inundaciones o desbordamiento de las tuberías de drenaje o de problemas en la operación de las PTAR (Renner 1996, Decker 1998, Ernst 2003). También es posible una mayor emisión

de contaminantes sin tratamiento previo hacia el ambiente (Espinosa y Otterpohl 2014).

Al comparar los efectos negativos de la exfiltración y de la infiltración, se observa que ambos fenómenos son nocivos para la economía y el ambiente. Sin embargo, la infiltración impacta en la operación y en la eficiencia de los sistemas de drenaje, así como en las PTAR de una forma mucho más evidente que la exfiltración (Ellis 2001 y 2010).

Bénédittis y Bertrand-Krajewski (2005) hicieron una investigación sobre las diferentes metodologías para la medición de la infiltración. El principio básico mencionado en el estudio para la medición de la infiltración está explicado en la ecuación (1). El flujo total de agua en las tuberías (Q_T) es comparado con el flujo de agua residual generada (Q_{WW}). La diferencia entre estos dos valores es igual a la infiltración (Q_{INF}):

$$Q_{INF} = Q_T - Q_{WW} \quad (1)$$

Se distingue básicamente entre dos categorías de métodos para la evaluación de la infiltración: (1) los métodos basados en mediciones de caudal y (2) los métodos químicos basados en mediciones de concentración de contaminantes. Para una descripción detallada de los métodos así como de sus ventajas y desventajas, se puede consultar a Bénédittis y Bertrand-Krajewski (2005) o a LUBW (2007).

Para apreciar la magnitud de la infiltración en un sistema de drenaje, ésta debe ponerse en un contexto apropiado. Con este fin se utilizan comúnmente los términos fracción de infiltración (FI) y exceso de agua por infiltración (EI) (Renner 2006). Estos términos pueden ser definidos con las ecuaciones (2) y (3). Donde Q_i es igual al volumen de agua de infiltración y Q_{ar} es igual al volumen de agua residual:

$$FI = \frac{Q_i}{Q_{ar} + Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$EI = \frac{Q_i}{Q_{ar}} \times 100\% \quad (3)$$

De acuerdo con un estudio realizado en 2009 por la Asociación Alemana de Agua y Agua Residual (DWA, por sus siglas en alemán) a 41 691 km de tuberías de drenaje de Alemania, la FI en temporada de sequías equivale a 25 % o menos en el 80 % de las tuberías evaluadas. El 20 % restante de las tuberías, tiene una FI equivalente al 25-50 % del total del agua canalizada (Berger y Falk 2011). Esto último equivale a un EI de 33-100%.

El volumen de infiltración en las diferentes estaciones del año puede variar entre el verano y el invierno en una proporción de hasta 1:10 (Brombach 2002). Por lo regular la infiltración es mucho mayor en temporada de lluvia o después de un deshielo que en el periodo seco. En la normatividad y en la literatura internacional revisada, no se encontró un consenso sobre la cantidad de infiltración máxima permitida en los drenajes. Lo anterior probablemente debido a que los efectos de la infiltración varían según el tipo de drenaje y las características específicas del agua residual que éste transporta. En el caso de Alemania, la legislación obliga a la compañía operadora del sistema de alcantarillado a reducir la infiltración cuando la FI sobrepasa el 50 % con el fin de evitar una dilución excesiva del agua residual.

En México, las infiltraciones al drenaje no están reguladas claramente. Las evaluaciones o planeaciones convencionales no realizan mediciones de infiltración en condiciones reales de operación, sino que las infiltraciones se excluyen por considerarse que el sistema debe ser hermético (CONAGUA 2009). Sin embargo, las infiltraciones están consideradas de manera indirecta dentro de los factores de seguridad para la construcción de las tuberías y de las PTAR.

Los objetivos de este estudio fueron determinar si existen indicios de infiltración o de dilución del agua residual en el drenaje sanitario de la ciudad de Tepic Nayarit (Méjico) durante la temporada de lluvia y estimar las proporciones de esta dilución. El sistema de drenaje en la ciudad es de tipo separado por lo que en teoría, el drenaje sanitario no debería verse afectado significativamente por la lluvia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de la infiltración con métodos de medición de caudal no se puede practicar cuando se desconoce la cantidad real de agua residual generada por falta de medidores de consumo, como en el caso de la ciudad de Tepic. Por lo anterior se llevó a cabo una estrategia alternativa basada en las concentraciones teóricas y reales de ciertos contaminantes en muestras de agua residual. Se midió la concentración de nitrógeno Kjeldahl, nitritos y nitratos, así como la concentración de fósforo total en muestras de agua residual de las tuberías. Los resultados de las mediciones se compararon con la concentración esperada en agua residual doméstica sin diluir para obtener el rango de infiltración probable en la ubicación.

Se escogieron tres puntos diferentes para obtener muestras de agua residual representativas de la

ciudad. De acuerdo a la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) sobre las regiones socioeconómicas de la ciudad, más del 90 % de la población vive en áreas geoestadísticas básicas (AGEB) clasificadas dentro de los estratos socioeconómicos 6 o 7 (en una escala del 1 al 7). Los estratos socioeconómicos no son una medida directa de la pobreza. Sin embargo, los estratos altos están comúnmente relacionados con el acceso a agua entubada y con el servicio de drenaje, así como con niveles más altos de educación y actividad económica (INEGI 2014). Asimismo los consumos de agua potable y la generación de agua residual son mayores en las clases socioeconómicas medias y altas (CONAGUA 2007). Por las razones anteriores se decidió ubicar los tres puntos de análisis en zonas aptas para tomar muestras de agua residual de hogares de los estratos socioeconómicos mencionados. Los puntos de muestreo fueron:

P1 Ubicado en la colonia Los Estadios

P2 Ubicado en el fraccionamiento Las Brisas

P3 Ubicado en el fraccionamiento Aves del Paraíso

La ubicación de los puntos de muestreo y la edad estimada de las tuberías de drenaje en cada zona se muestran en la **figura 1**. En promedio, las tuberías de toda la ciudad tienen una edad de 40 años (H. XXXVIII Ayuntamiento de Tepic 2009). El punto de muestreo P1 se consideró como prioritario dado que su ubicación permitiría colectar muestras representativas de un mayor número de AGEB, que a su vez estaban relacionadas a una población más numerosa.

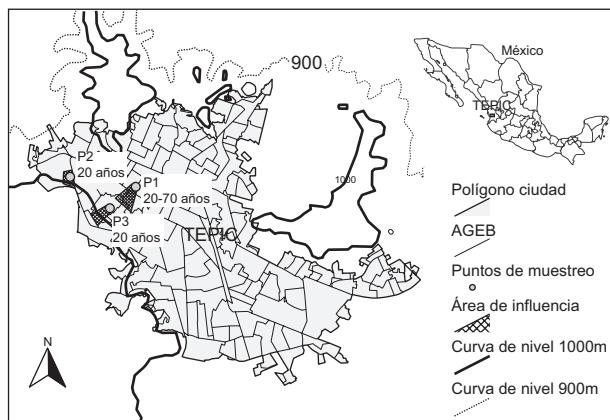


Fig. 1. Ubicación de los puntos de muestreo y edades estimadas de las tuberías en la ciudad de Tepic (adaptación de imagen obtenida del sitio de cartografía estadística urbana del INEGI en internet: www.inegi.org.mx)

El muestreo se llevó a cabo de acuerdo con los lineamientos que marca la norma oficial Mexicana NMX-AA-003-1980 (SCFI 1980) durante los meses de julio y septiembre de 2011. Los horarios de muestreo fueron acordados con el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Tepic (SIAPA Tepic), en los que se tomaron en cuenta los horarios de gasto pico y de bajo consumo. Dichos horarios fueron los siguientes: 6 h (bajo), 9 h (pico), 12 h (bajo), 15 h (pico), 18 h (bajo), 21 h (pico). Dadas las condiciones de inseguridad en la ciudad en esos meses, se decidió no tomar muestras por las noches, por lo que no fue posible cumplir con el requisito de 24 h de muestreo. Se asumió que el muestreo de las 6 h representaría el flujo durante la noche. Estas condiciones de muestreo son consideradas suficientes para cumplir con el objetivo de investigación. Se hicieron cinco muestreos al P1, tres muestreos al P2 y dos muestreos al P3, con lo que se obtuvo un total de diez muestras compuestas de agua residual.

Se midió el caudal de agua en el lugar de muestreo para cada muestra simple en el respectivo horario con el propósito de generar las muestras compuestas. Los puntos de muestreo P1 y P2 son de tipo caída libre, por lo que el caudal en esas ubicaciones se midió con métodos manuales simples de llenado en recipiente aforado con anotación del tiempo de llenado. El punto de muestreo P3 es un pozo de inspección donde no fue posible medir el caudal. Para la generación de muestras compuestas se utilizó la altura del nivel de agua al momento de muestreo como indicador del caudal. Además se determinó para cada muestra simple la temperatura, el pH, los sólidos disueltos totales (SDT), el oxígeno disuelto (OD) y la conductividad. Estas mediciones se llevaron a cabo con un medidor multiparámetro tipo HI 9828 de la marca Hanna Instruments, calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Se analizaron los siguientes parámetros en las muestras compuestas:

- Nitrógeno total Kjeldahl (TKN). De acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010 (SCFI 2010), método macro.
- Nitritos y nitratos. Se analizaron juntos de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 (SCFI 2001b), método de reducción con Cadmio cuperizado.
- Fósforo total (Ptot). De acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 (SCFI 2001a), método del ácido vanadomolibdofosfórico.

Debido al marco de tiempo disponible para la ejecución del proyecto y a que el P1 se consideró

CUADRO I. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES IN SITU DE LAS MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL

| Parámetro | Resultados por punto de muestreo | | | Rango de referencia |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------------------------|
| | P1 | P2 | P3 | |
| Temperatura (°C) | 26.66 ± 2% | 25.59 ± 2% | 28.25 ± 1% | Varía según la región geográfica |
| pH | 7.83 ± 5% | 7.30 ± 2% | 7.34 ± 3% | 6 – 9 ¹ |
| Sólidos disueltos totales (mg/L) | 435.80 ± 26% | 328.00 ± 22% | 382.88 ± 25% | 270 – 860 ¹ |
| Oxígeno disuelto (mg/L) | 1.05 ± 45% | 0.51 ± 21% | 1.35 ± 13% | S.R. |
| Conductividad (μS/cm) | 875.07 ± 27% | 693.81 ± 21% | 711.63 ± 29% | 700 – 1200 ² |

S.R.: sin referencia

¹Tchobanoglous *et al.* (2003)²Göksel *et al.* (2006)

prioritario, se decidió hacer las mediciones de TKN y de Ptot de las muestras compuestas del P1 por triplicado, mientras que las mediciones de los puntos P2 y P3 se hicieron por duplicado. Para la determinación de los nitritos y nitratos se analizaron por duplicado tres de las muestras compuestas del punto P1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones *in situ* de temperatura, pH, SDT, OD y conductividad se encuentran en el **cuadro I**. Se observa que los parámetros de pH, SDT y conductividad están dentro de los rangos típicos de aguas residuales mencionados en las referencias del **cuadro I**. La temperatura promedio de las muestras fue de 26 a 28 °C y se considera como un valor normal para Tepic, dado que la temperatura ambiente en los meses de muestreo oscilaba alrededor de los 26 °C (INEGI 2012). Adicionalmente los procesos domésticos y productivos tienden a agregar flujos de agua caliente al drenaje. El OD presentó valores promedio entre 0.5 y 1.35 mg/L.

Los resultados presentados en este estudio se enfocan en la medición de nitrógeno y fósforo, así como en las mediciones de flujo. Los resultados de las mediciones de TKN para cada muestra compuesta y lugar de muestreo se encuentran en la **figura 2**. Los resultados de las mediciones de Ptot para cada muestra compuesta se encuentran en la **figura 3**. En ambas figuras se observa el valor obtenido para cada repetición de los análisis a las muestras compuestas según el punto de muestreo (P1, P2 y P3). Adicionalmente se encuentran indicados para cada grupo de valores: el valor mínimo y máximo, el valor promedio, la desviación estándar y la mediana.

En la **figura 2** se aprecia que las concentraciones de TKN obtenidas en los puntos de muestreo P1 y P2 son en promedio mayores que las del punto de

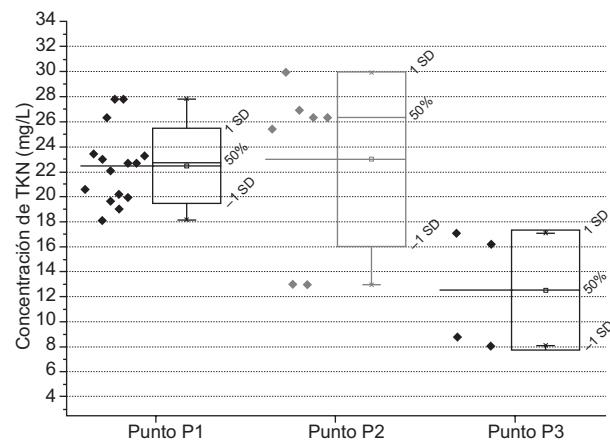


Fig. 2. Resultados de las mediciones de TKN en los puntos de muestreo. Para cada punto de muestreo se presentan los resultados de las mediciones efectuadas a las muestras compuestas incluyendo las repeticiones. Abreviaturas: TKN - nitrógeno total Kjeldahl, SD - desviación estándar.

muestreo P3. Dado que el punto de muestreo P3 se trata de un fraccionamiento de clase socioeconómica alta, se considera que existe un mayor consumo de agua potable (CONAGUA 2007) y por lo tanto una dilución mayor de los contaminantes. Sin embargo, en el marco de esta investigación no fue posible medir el flujo en este punto de muestreo ni conocer la cantidad exacta de habitantes conectados a esta tubería para comprobar esa posible explicación. Una explicación alternativa sería una mayor infiltración a esas tuberías.

Asimismo se observa en la **figura 2** que las concentraciones de TKN obtenidas para el punto P2 muestran una mayor variabilidad. La explicación encontrada después de consultar al presidente de la colonia, es que durante los primeros días de muestreo cuando se obtuvieron las concentraciones más altas, la colonia no recibió reabastecimiento de agua potable del SIAPA Tepic. Los habitantes dependieron

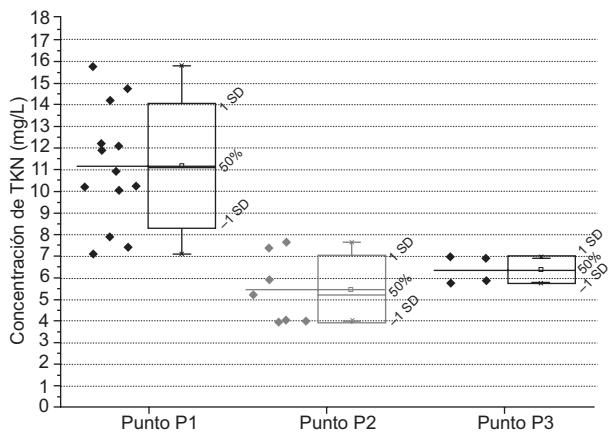


Fig. 3. Resultados de las mediciones de Ptot en los puntos de muestreo. Para cada punto de muestreo se presentan los resultados de las mediciones efectuadas a las muestras compuestas incluyendo las repeticiones. Abreviaturas: Ptot - fósforo total, SD - desviación estándar.
Nota: los análisis de una muestra de Ptot en el punto de muestreo P1 fueron descartados por mostrar resultados ilógicos.

únicamente del agua previamente almacenada en sus tinacos (tanques de agua en los techos de las viviendas) y podría asumirse que los usuarios estaban consumiendo menos agua para sus actividades diarias de manera consciente dada la situación. Las últimas mediciones del punto P2 muestran una concentración mucho más baja que las primeras mediciones. Una posible explicación es la reiniciación de actividades pendientes de aseo y limpieza acumuladas en los hogares por la falta de abastecimiento de agua, produciéndose una mayor dilución del nitrógeno debido al incremento abrupto de uso de agua.

Las mediciones de Ptot de la figura 3, muestran que las concentraciones más altas fueron obtenidas en el punto de muestreo P1. Para entender los resultados es necesario comprender las fuentes de fósforo en el contexto urbano. De acuerdo con los estudios realizados por la DWA (2008) en aguas residuales crudas provenientes de áreas residenciales, el 75 % del total del contenido de fósforo tiene origen en las heces y la orina y está directamente relacionado con la dieta alimenticia de la comunidad. El 25 % restante tiene origen en las aguas grises esto es, en las aguas usadas para las actividades de limpieza personal y del hogar lo cual está directamente relacionado con el uso de productos químicos como los detergentes, jabones, champús, cosméticos, etc. En el Reino Unido, la dieta alimenticia sólo contribuye con un 40 % de la carga total de fósforo en el contexto residencial y el restante 60 % proviene de productos químicos (Comber *et al.* 2013). Las actividades comerciales, industriales

y de servicios en las áreas de uso mixto alteran la composición del agua residual doméstica ya que se hace un uso más intensivo de productos químicos. Por ejemplo, las lavanderías públicas o industriales emiten aguas residuales con una concentración más elevada de fósforo con respecto a las del agua residual doméstica debido a que el fósforo es uno de los constituyentes principales de muchos productos de limpieza (Patterson 2001, APHA 2005, Russel 2006).

A pesar de ser un área principalmente residencial, el punto de muestreo P1, cuenta también con actividades de comercio y servicios (restaurantes, panaderías, tiendas, oficinas, etc.), así como con algunas actividades a pequeña escala de la industria ligera como lecherías, pollerías, tintorerías, lavanderías y reparación de autos entre otras. Los otros puntos de muestreo presentan únicamente uso residencial. Las altas concentraciones medidas de Ptot en el punto de muestreo P1 podrían tener su origen en actividades no domésticas que hacen uso intensivo de productos con fósforo.

Los resultados de las tres mediciones de nitritos y nitratos en el punto de muestreo P1 mostraron cantidades muy bajas cercanas a cero, tal como es de esperarse en agua residual doméstica no tratada (Tchobanoglou *et al.* 2003, APHA 2005). Las concentraciones promedio medidas en las tres muestras compuestas fueron 0.07, 0.035 y 0.12 respectivamente.

La figura 4 expone las concentraciones promedio obtenidas para cada muestra y punto de muestreo comparadas con el flujo promedio medido (excepto para el punto P3 donde no fue posible medir el flujo). En los dos diagramas de la figura 4 se aprecia claramente que la concentración de TKN aumenta cuando el flujo es menor y viceversa. Esto nos indica que el TKN es diluido efectivamente cuando el flujo de agua es mayor. El fósforo por su parte no mostró una tendencia clara de correlación con el flujo medido. Se observa incluso que las diferencias de flujo en el punto P2 tuvieron una influencia casi nula en las diferencias de concentración.

En el cuadro II se presentan las concentraciones promedio obtenidas de las muestras compuestas y dos valores de referencia para agua residual doméstica sin diluir. Las últimas dos columnas del cuadro II muestran la infiltración probable calculada en este estudio. Como concentración de referencia para los cálculos se tomó la mencionada por Martínez *et al.* (2011). Se consideró esta referencia como la más adecuada por tratarse de estudios en una ciudad mexicana.

Para el cálculo de la infiltración se aplicó la ecuación (4) donde C1 es igual a la concentración

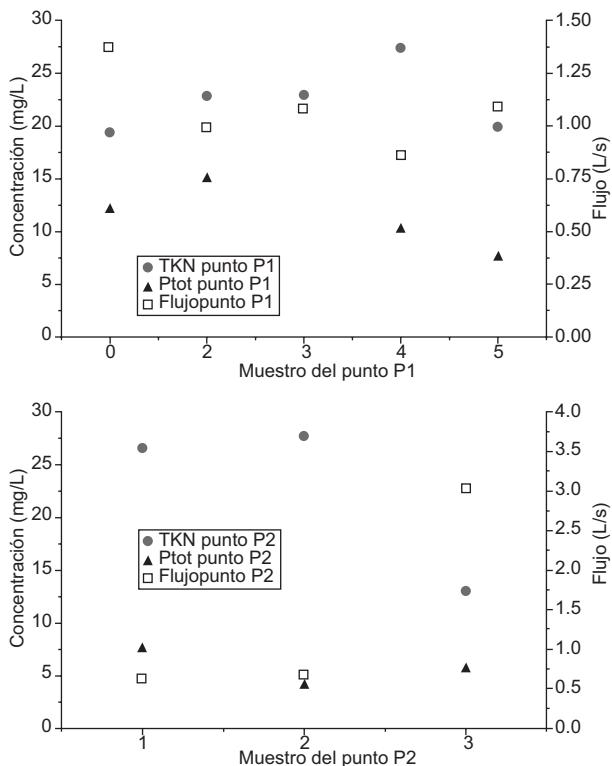


Fig. 4. Concentraciones promedio medidas de TKN y Ptot para cada muestra compuesta comparadas con el flujo medido en el punto de muestreo. TKN - nitrógeno total Kjeldahl, Ptot - fósforo total.

Nota: los análisis a la tercera muestra de Ptot en el punto de muestreo P1 fueron descartados por mostrar resultados ilógicos.

de referencia y C2 es la concentración medida en el punto de muestreo correspondiente:

$$\% \text{ Infiltación} = \left(\frac{C1}{C2} \right) - 1 \times 100 \% \quad (4)$$

CUADRO II. INFILTRACIÓN PROBABLE OBTENIDA POR COMPARACIÓN CON AGUA RESIDUAL SIN DILUIR

| Fuente | Nitrógeno (mg/L) | Fósforo (mg/L) | Infiltración probable ^a |
|--|-------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Martínez <i>et al.</i> (2011) ^b | 40.60 (Ntot) | 6.95 (P de PO ₄) | Mínima ↓ |
| Tchobanoglou <i>et al.</i> (2003) ^c | 70.00 (Ntot) | 16.00 (Ptot) | Máxima ↓ |
| Promedio punto de muestreo P1 | 22.46 ± 14% (TKN) | 11.16 ± 28% | 59% 110% |
| Promedio punto de muestreo P2 | 22.41 ± 36% (TKN) | 5.72 ± 31% | 33% 183% |
| Promedio punto de muestreo P3 | 12.50 ± 46% (TKN) | 6.30 ± 12% | 122% 501% |

^a Cálculo basado en la concentración de nitrógeno. Equivale al exceso de agua por infiltración EI. La concentración de referencia es la mencionada por Martínez *et al.* (2011).

^b Datos para el agua residual doméstica en San Luis Potosí, con base en una generación de 154 L por persona por día.

^c Datos para agua residual doméstica en los Estados Unidos de Norteamérica, con base en un flujo de agua residual de 240 L por persona por día que incluye agua doméstica, comercial e industrial.

Ntot: nitrógeno total, TKN: nitrógeno Kjeldahl, Ptot: fósforo total.

Se asumió que el TKN en aguas residuales domésticas frescas puede considerarse como muy cercano al nitrógeno total, puesto que el contenido de nitritos y nitratos en aguas residuales frescas sin tratar es normalmente cercano a cero. Lo anterior se comprobó con las mediciones de nitrito y nitrato en el punto P1. Dado que el fósforo no mostró una relación clara con las variaciones de flujo, se decidió calcular la infiltración probable basada en el nitrógeno únicamente.

La infiltración probable se calculó para el punto P1 en un rango de 59 - 110 %, para el punto P2 en un rango del 33 - 183 % y para el punto P3 en un rango de 122 - 501%. Este porcentaje se debe interpretar como el volumen adicional de agua requerido para llegar de la concentración de referencia a la concentración medida en este estudio. En otras palabras es el factor de dilución del agua residual.

Este volumen adicional de agua puede estar compuesto de agua de infiltraciones así como de un consumo de agua potable más alto que en la referencia. En el caso del punto P3 la proporción correspondiente a un consumo alto puede ser más significativa que en los otros puntos de muestreo ya que como se mencionó anteriormente, se trata de un fraccionamiento de clase socioeconómica alta donde se consume más agua potable que en los fraccionamientos de clase media y popular (CONAGUA 2007).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las mediciones de nitrógeno y fósforo en drenajes de zonas residenciales de la ciudad de Tepic permitieron hacer un primer acercamiento a la estimación del factor de dilución que el agua residual sufre en las tuberías y una evaluación indirecta de la infiltración. Se obtuvieron

valores teóricos de dilución en temporada de lluvia del orden del 30 % hasta 500 % dependiendo del punto y día de muestreo, siendo los valores en su mayoría más altos que 50 %. Se demostró que existe una dilución significativa del agua residual en los drenajes a pesar de tratarse de un sistema separado de tuberías. Durante la trayectoria del agua residual desde el punto de muestreo hasta su lugar de tratamiento o vertido, la dilución podría aumentar aún más dado que las tuberías de la ciudad tienen en su mayoría más de 40 años de antigüedad y su condición va de regular a mala (H. XXXIX Ayuntamiento de la ciudad de Tepic 2012), lo cual favorece una alta infiltración.

Una infiltración incontrolada y no calculada al drenaje tiene costos económicos y ambientales que pueden generarse debido al desbordamiento de las tuberías por sobrecarga hidráulica o por problemas en la operación de las PTAR. Estas últimas requieren de condiciones de concentración de nutrientes para mantener su equilibrio y efectividad de tratamiento (Renner 1996, Decker 1998). Dichos problemas podrían continuar aún después de la temporada de lluvia según tarde en recuperarse el equilibrio biológico en la PTAR. La infiltración también puede ocasionar una emisión mayor de contaminantes hacia el ambiente ya que al rebasar la capacidad de las PTAR se aumentan las descargas directas al río (Espinosa y Otterpohl 2014).

Un aspecto relativamente positivo de la infiltración es que las concentraciones de contaminantes en las descargas son menores al llegar al río. Por consiguiente la alteración del equilibrio químico y biológico de éste podría ser menor en el corto plazo. Sin embargo la cantidad total de contaminantes vertidos al río permanece inalterada o bien podría aumentar al no recibir tratamiento previo en una PTAR.

Para hacer una evaluación más detallada con la misma estrategia usada en esta investigación sería necesario conocer la composición típica sin diluir del agua residual doméstica en la ciudad y realizar mediciones nuevamente en temporada de lluvia y en temporada seca. De esta manera se podrá diferenciar también la infiltración base (proveniente de agua subterránea, fugas de agua potable y descargas ilegales) de la infiltración por lluvia. El método químico para la evaluación de las infiltraciones desarrollado por Hager *et al.* (1985) provee a su vez una estrategia para determinar la infiltración de manera detallada con base en mediciones de concentración de contaminantes. Este método podría ser usado en Tepic al no contar con medidores de flujo que permitan llevar a cabo otras estrategias

de valoración. Sin embargo se trata de un esquema costoso de toma de muestras y análisis aunado a esfuerzos intensivos de mano de obra o al empleo de aparatos de medición automatizados.

Alternativamente se puede recurrir a la información existente sobre el volumen consumido de agua potable en la ciudad y a los análisis realizados al agua residual (TKN, Ntot, Ptot). Esta información combinada con conocimiento sobre la producción y composición química teórica del agua residual pueden ayudar a generar un balance general de agua y nutrientes en la ciudad y a calcular el volumen teórico total de infiltración.

Independientemente del método para determinar la infiltración, se considera que una evaluación detallada de la misma es de gran importancia para mejorar el control sobre los procesos de transporte y tratamiento de agua residual en la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se realizó como una colaboración directa de la Universidad Técnica de Hamburgo (Instituto de Investigación en Aguas residuales y Protección del Agua) y la Universidad Autónoma de Nayarit (Unidad Académica de Ciencias Básicas e Ingeniería) dentro del marco del proyecto “Material Flow Analysis of the Urban Water System in Tepic Mexico: Integral Evaluation and Improvement Options” que es financiado por el Ministerio Alemán de Educación e Investigación (BMBF) a través del programa “International Post-graduate Studies in Water Technologies (IPSWaT)”. Se reconoce en especial el respaldo del QFB José Francisco Solorio de la Garza y del M. en C. Francisco Julián Aranguré Zúñiga de la ACBI-UAN en la ejecución del proyecto. Se agradece también al Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Tepic, en especial al Ing. Gregorio Montero Galindo, por su colaboración en la planeación del proyecto y por el acceso a los puntos de muestreo. Finalmente, se reconoce el apoyo del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por financiar la estancia de investigación de P. Evers en México.

REFERENCIAS

- APHA (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21a. Ed. American Public Health Association. Washington, D.C. EUA. 1325 pp.

- Bénédittis J. y Bertrand-Krajewski J.L. (2005). Infiltration in sewer systems: comparison of measurement methods. *Water Sci. Technol.* 52, 219-227.
- Berger C. y Falk C. (2011). Zustand der Kanalisation: Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009. KA - Korrespondenz Abwasser Abfall 58, 26-46.
- Brombach H. (2002). Urban storm water practice in Germany. Memorias. 9th International Conference on Urban Drainage. Portland, Oregon, EUA. 8 al 13 de septiembre, pp 1-19.
- Comber S., Gardner M., Georges K., Blackwood D. y Gilmour D. (2013). Domestic source of phosphorus to sewage treatment works. *Environ. Technol.* 34, 1349-1358.
- CONAGUA (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos. Comisión Nacional del Agua. Manual. México. 79 pp [en línea]. <ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros%20pdf%202007/Datos%20B%20E1sicos.pdf>. 18/11/2013.
- CONAGUA (2009). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: alcantarillado sanitario. Comisión Nacional del Agua. Manual. México. 122 pp. [en línea]. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-29.pdf>. 18/11/2013.
- Decker J. (1998). Auswirkungen von Fremdwasser auf Abwasseranlagen und Gewässer. Tesis de doctorado. Institut für Siedlungswasserwirtschaft. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aquisgrán, Alemania. 270 pp.
- DWA (2008). Neuartige Sanitärsysteme. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft. Hennef, Alemania. 326 pp.
- Ellis B. (2001). Sewer infiltration/exfiltration and interactions with sewer flows and groundwater quality. Memorias. INTERURBA II Interactions between Sewers, Treatment Plants and Receiving Waters. Lisboa, Portugal. 19 al 22 de febrero, 2001, pp 311-319.
- Ellis B. (2010). Sewer performance: inflow, infiltration and exfiltration. Memorias. 6th International Conference on Sewer Process and Networks. Surfers Paradise, Gold Coast, Australia. 7 al 10 de noviembre, 2010. Archivo electrónico.
- Ernst R. (2003). Fremdwasser und seine Folgen für Kommunale Investitionsentscheidungen. Fallbeispiel Kommunen Vöhringen und Sulz a.N. [en línea]. <http://www.ernst-co.de/res/Vortrage/vortratv.pdf>. 04/09/2013.
- Espinosa G. y Otterpohl R. (2014). Assessing material flows in urban systems: an approach to maximize the use of incomplete data sets. *Water Sci. Technol.* 70, 1135-1142.
- Fischer M. (1991). Fragen zum Fremdwasser aus der Sicht des Betriebspersonals. KA-Betriebs-Info 21, 423-426.
- Göksel A., Alp Ö., Gulyas H. y Büst B. (2006). Lesson A1: characteristic, analytic and sampling of wastewater. En: EMWater E-Learning Course. [en línea]. http://cgi.tu-harburg.de/~awwweb/wbt/emwater/module_a.html. 15/11/2013.
- H. XXXVIII. Ayuntamiento de Tepic (2009). Plan municipal de desarrollo 2008-2011 [en línea]. http://www.nayarit.gob.mx/transparenciafiscal/planes-municipales/2008/plan_desarrollo_tepic_po220109.pdf. 26/01/2015.
- H. XXXIX. Ayuntamiento de la ciudad de Tepic (2012). Plan municipal de desarrollo Tepic 2011-2014 [en línea]. <http://transparenciafiscal.tepic.gob.mx/docs/sistema/docs/2013/pmd/PMD-2011-2014.pdf>. 26/01/2015.
- Hager W., Rayman B. y Bretscher U. (1985). Die Berechnung des Fremdwasseranfalls in Abwassersystemen. *GF/Wasser Abwasser* 126, 582-588.
- Hennerkes J. (2006). Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentstorgung. Tesis de doctorado. Fakultät für Bauingenieurwesen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aquisgrán, Alemania. 197 pp. [en línea] <http://publications.rwth-aachen.de/record/61535>. 26/01/2015.
- Hua J. (2007) Transport- und Umsatzprozesse bei der Abwasserversickerung aus undichten Kanälen. Tesis de doctorado. Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften. Universität Karlsruhe. Karlsruhe, Alemania. 156 pp.
- INEGI (2012). Anuario estadístico de Nayarit 2012. Aspectos geográficos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aeel2/estatal/nay/default.htm>. 06/03/2013.
- INEGI (2014). Regiones socioeconómicas de México. Archivo de Datos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <http://sc.inegi.gob.mx/niveles/index.jsp>. 18/08/2014.
- LUBW (2007). Fremdwasser in kommunalen Kläranlagen: Erkennen, bewerten und vermeiden. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Manual. Karlsruhe, Alemania. 116 pp.
- Martínez S.E., Escolero O. y Wolf L. (2011). Total urban water cycle models in semiarid environments - Quantitative scenario analysis at the area of San Luis Potosí, México. *Water Resour. Manage.* 25, 239-263.
- Patterson R.A. (2001). Wastewater quality relationships with reuse options. *Water Sci. Technol.* 43, 147-154.
- Read G.F. y Vickridge I.G. (1997). Sewers: Rehabilitation and new construction: repair and renovation. Arnold. Londres, Inglaterra. 414 pp.
- Renner H. (1996) Fremdwasser in Abwasseranlagen. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz. Graz, Austria. 82 pp.

- Renner H. (2006) Fremdwasser. En: Abwasserleitung (Bauhaus Universität Weimar, Ed.) Weimar Univ.-Verl. Weimar, Alemania, pp. 299-313.
- Russel D. (2006). Practical wastewater treatment. John Wiley and Sons, Inc. New Jearsey, EUA. 271 pp.
- SCFI (1980). Norma mexicana NMX-AA-003-1980. Aguas residuales - muestreo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la federación. 25 de marzo de 1980.
- SCFI (2001a). Norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de fósforo total en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la federación. 17 de abril de 2001.
- SCFI (2001b). Norma mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la federación. 13 de agosto de 2001.
- SCFI(2010). Norma mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de aguas - Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario oficial de la federación. 3 de marzo de 2011.
- Tchobanoglous G., Burton F.L. y Stensel H.D. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. 4a ed. McGraw-Hill. Boston, EUA. 1819 pp.