



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

ANÁLISIS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS E INSTANTÁNEOS EN ALGUNAS ESTACIONES DE BOMBEO DE MONTEVIDEO PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES DE TIEMPO SECO E INTRUSIÓN PLUVIAL EN REDES DE SANEAMIENTO.

Santiago Urrestarazu Vincent (*)

Ingeniero civil con especialización en ingeniería hidráulica y ambiental, egresado de la UdelaR (año 2007). Master of Science en Ingeniería Hidráulica, del *UNESCO-IHE Institute for Water Education*, Delft, Holanda. Diez años de experiencia en consultoría de agua, saneamiento y drenaje.

CSI Ingenieros

Ernesto Cedrez

CSI Ingenieros

TEMA: Tema 1

CUENCA: Río de la Plata

ODS: 6



Soriano 1180, Montevideo, Uruguay. CP: 11100. Tel: 29021066. Email: surrestarazu@csi-ing.com

RESUMEN

En el marco de la elaboración del diagnóstico para Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano de Montevideo (PDSUM), se realizó un análisis de consumos de agua y de caudales bombeados en estaciones de bombeo, con el objetivo de estimar los caudales que el sistema actualmente gestiona. En particular, el objetivo es lograr entender lo que sucede con relación a los distintos componentes de dichos caudales como ser el doméstico, industrial y la infiltración, y estimar los factores de pico diario y horario. Adicionalmente, se pretende estimar los caudales de intrusión a redes cloacales en eventos de lluvia. Si bien la información disponible para esto no es del todo confiable, se logró estimar dotaciones de agua potable (225 l/hab.día en promedio) y niveles de infiltración (0.088 l/s.ha en promedio) en distintas áreas de la ciudad. Asimismo, se realizaron estimaciones de los coeficientes K1 (máximo diario) y K2 (máximo horario) para la determinación de caudales máximos, y se compararon con valores de literatura, siendo en términos generales similares. Por último, se logró estimar el umbral mínimo de intrusión pluvial en redes cloacales, que arrojó valores elevados de conexión clandestina de pluviales en redes cloacales.

Palabras Clave: dotación agua potable, caudal tiempo seco, coeficiente pico, intrusión pluvial.

INTRODUCCION

Una de las funciones del sistema de saneamiento es la de recolectar, conducir, tratar y disponer las aguas servidas que son generadas en la ciudad, llamando aguas servidas a aquellas generadas en lo que habitualmente se llama tiempo seco; son las aguas que típicamente serían conducidas en las redes de saneamiento de un sistema separativo.

Una correcta estimación de estos caudales permite un mejor análisis de la situación actual y futura del sistema en cuanto a su capacidad de conducción y disposición en tiempo seco, tanto en redes como en puntos singulares del sistema: estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, emisarios.

En cualquier ciudad, y en Montevideo en particular, estos caudales son mayormente producto del consumo de agua en la misma, no sólo el agua potable suministrada por el ente a cargo de ello (OSE en este caso) sino aquella proveniente de fuentes propias (generalmente perforaciones en industrias). Gran parte de este consumo es volcado a la red de saneamiento. A ellos se le suman otros aportes, como ser caudales de infiltración desde el suelo a los colectores así como caudales de agua "limpia" que, producto



IX Congreso Nacional de AIDIS Integrando Cuencas para el Desarrollo Sostenible



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

de las fugas (pérdidas físicas) que ocurren en la red de distribución de agua potable, escurren por calzada e ingresan a los colectores de saneamiento por las bocas de tormenta de las redes unitarias o mixtas.

Bajo este rubro de “otros aportes” podría incluirse la intrusión pluvial en redes separativas. En este estudio no se contempla este caudal como parte del caudal de aguas servidas en tiempo seco, aunque sí se realiza una estimación del mismo.

OBJETIVO

En el marco de la elaboración del diagnóstico para Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano de Montevideo (PDSUM), se realizó un análisis de consumos de agua y de caudales bombeados en estaciones de bombeo con el objetivo de estimar los caudales que el sistema actualmente gestiona. Asimismo, el objetivo es lograr entender lo que sucede con relación a los distintos componentes de dichos caudales como ser el doméstico, industrial y la infiltración, así como estimar los factores de pico diario y horario.

Adicionalmente, se pretende estimar los caudales de intrusión a redes cloacales en eventos de lluvia.

METODOLOGÍA

Mediante el análisis de consumos de agua de OSE y de fuentes propias de agua, georreferenciados, y vinculados a información censal, se estimaron consumos de agua per cápita para las distintas Áreas Homogéneas (AAHH) de la ciudad de Montevideo. Se consideran consumos de tipo residencia, industrial, comercial y de gobierno.

Por otra parte, para cada una de las llamadas Áreas de Saneamiento de Montevideo (se las podría pensar como Cuencas de Saneamiento) se estimaron coeficientes de conexión efectiva a las redes y coeficientes de retorno.

Una vez estimado el consumo de agua por AAHH, los coeficientes de conexión y de retorno, se estimó la generación de efluentes que son volcados a la red. Habiendo asimismo estimado el ingreso de agua limpia a las redes unitarias/mixtas por pérdidas físicas en la red de agua, se realizó un balance de caudales medios en varias estaciones de bombeo. Este balance permitió estimar el caudal medio de infiltración en las cuencas de cada una de ellas.

Para realizar este tipo de estimaciones, se trabajó con toda la información a nivel de zona censal, agrupándolas luego por región geográfica según fuese conveniente; para realizar los balances en estaciones de bombeo, se las agrupó por cuenca de aporte de las distintas estaciones.

Por otra parte, mediante el análisis de caudales medios diarios en alguna de las estaciones de bombeo de Montevideo, se realizó una estimación de los valores del coeficiente K1 (coeficiente de pico diario), relacionándolo con el tamaño de la cuenca de aporte a cada una de ellas.

Mediante el análisis de caudales instantáneos en algunas estaciones de bombeo, se procuró estimar valores del coeficiente K2 (coeficiente de pico horario).

Se compararon estos valores con valores propuestos por el Plan Director de Saneamiento del año 1995, y con valores de literatura.

El análisis de caudales instantáneos en algunas estaciones de bombeo, correlacionándolo con los registros de precipitación de los pluviómetros de la IM en las respectivas cuencas, permitió realizar una estimación de los niveles de intrusión pluvial en redes separativas. Para los eventos de lluvia analizados, se calcula la precipitación acumulada (mm) en el evento de lluvia. Esta precipitación se multiplica por el



IX Congreso Nacional de AIDIS Integrando Cuencas para el Desarrollo Sostenible



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

área de la cuenca de la estación de bombeo correspondiente, y se calcula el volumen de agua precipitado en la cuenca (asumiendo una precipitación uniforme en la cuenca).

Por otra parte, con la curva de caudal de bombeo durante dicho evento se calcula el volumen adicional de efluentes bombeados respecto al volumen que debería haber bombeado de no haber existido intrusión pluvial.

Se calcula luego el cociente entre el caudal adicional bombeado (intrusión pluvial) y el volumen de agua precipitado, correspondiendo dicho cociente al porcentaje del área de la cuenca cuyos pluviales llegaron, a través de la red cloacal, a ser bombeados por la estación de bombeo. Así, este valor representa un umbral mínimo para el porcentaje de área de cuenca cuyas pluviales se encuentran conectadas a la red cloacal, pues parte del caudal intruído es vertido en la propia estación (situación que se verifica para cada evento en función de los registros de vertimiento tipo VT1) y factiblemente en la propia red.

Adicionalmente, con el caudal máximo de bombeo se calcula un caudal máximo de intrusión pluvial en términos de caudal por área saneada y caudal por kilómetro de colector. Nuevamente, estos valores representan un umbral mínimo para dichos caudales.

RESULTADOS

Los caudales de efluentes provenientes del consumo de agua residencial son los más importantes en el sistema, llegando prácticamente al 50% del caudal total de agua servida, y al 75% del caudal proveniente del consumo de agua en la ciudad. Se calculan a partir de la cantidad de habitantes por zona censal y el consumo per cápita (dotación) de agua para consumo residencial para dicha zona censal, que será función del AAHH en la que se encuentra.

Para la situación actual se consideran los datos de población y consumo de agua potable del año 2011, año del último censo poblacional. Aquellas cuentas de OSE que pudieron ser georreferenciadas, y para las que se tenían registros de consumos para algún mes del año 2011, fueron asignadas a las distintas AAHH, calculando para cada una de ellas el consumo promedio de agua de uso residencial por unidad habitacional. Para las AAHH para las que no se pudo asignar ninguna cuenta de OSE, se tomaron los valores calculados en los avances del PDSUM del 2007.

Por otra parte, para cada AAHH se calculó la tasa de ocupación de viviendas (personas/vivienda ocupada) según los datos censales. Asumiendo que las unidades habitacionales de OSE que registran algún consumo son asimilables a viviendas ocupadas, se calcula el cociente entre el consumo medio por unidad de OSE y la tasa de ocupación de viviendas, obteniendo el consumo per cápita para cada AAHH, todo esto para la situación actual.

Estos valores son ajustados en forma uniforme de modo de que la suma de estos consumos, calculados a partir del consumo per cápita y población de cada AAHH, coincidan el consumo de agua residencial para todo el Departamento.

Estos números surgen de consumos de agua que OSE logra registrar y facturar a sus usuarios, pero no contemplan las pérdidas aparentes que se dan en el sistema por errores en la micromedición y por consumos clandestinos, los cuales constituyen parte del consumo real de agua y por lo tanto del agua servida que es volcada al sistema de saneamiento. Para contemplarlas, los consumos medidos son aumentados considerando que los mismos representan un 80% del consumo total de agua para uso residencial.

Para los consumos de agua comercial, público e industrial, se sigue idéntico procedimiento. En el caso del industrial, se suman los registros de consumo de agua de fuentes propias que la IM dispone, pues es agua que finalmente es volcada en la red de saneamiento.



IX Congreso Nacional de AIDIS
Integrando Cuencas para el Desarrollo Sostenible



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

En promedio, la dotación de consumo de agua fue estimada en 225 l/hab.día, incluyendo todos los tipos de consumo. La siguiente tabla muestra estos resultados discriminando por Gran Área, y a su vez los compara con los resultados que se habían obtenido en un análisis similar con datos del año 2004.

Tabla 1 – Dotación por Gran Área

Gran área	Dotación (l/persona/día) 2011					Dotación (l/persona/día) 2004
	Residencial	Gobierno	Comercial	Industrial	Total	Total
Área central	180	33	58	47	317	235
Costa Montevideo	231	7	27	13	278	207
Intermedia central	186	25	43	7	260	199
Intermedia este	156	10	12	10	188	151
Intermedia oeste	155	6	11	5	177	156
Periferia este	140	11	8	15	174	133
Periferia norte	136	6	3	3	147	118
Periferia oeste	137	23	6	39	205	141
Total general	170	15	22	18	225	176

Respecto al coeficiente de conexión efectiva a la red, se analizaron datos de conexión a redes ejecutadas en los Planes de Saneamiento PSU III y PSU IV, y se consideraron valores desde 40% (obra de redes de Casavalle, PSU III) hasta del 100%.

Los coeficientes de retorno, en principio distinto para cada Área de Saneamiento, varían entre 0,7 y 0,9.

Realizando entonces un balance de caudales medios en varias estaciones de bombeo, para lo cual se analizó a su vez el registro diario de horímetros de los equipos de bombeo, curvas de las bombas, registros de operación, registros de pluviómetros, niveles del mar, etc, se obtiene el caudal medio de infiltración en las cuencas de cada una de ellas, obteniéndose valores de entre 0.012 y 0.426 l/s/ha. En particular, en Punta Carretas se obtuvo un valor de 0.088 l/s/ha, siendo esto un 23% del caudal total de aguas servidas afluente a la estación.

Tabla 2: Tasas de infiltración obtenidas por estación de bombeo

Estación de Bombeo	Tasa infiltración (l/s/ha)	Porcentaje sobre total afluente a EB (%)	Edad promedio de la red (años)	Permeabilidad del suelo
Maroñas	0.067	44%	20	Baja
Punta Gorda	0.012	9%	40	Alta
Colombes	0.086	39%	35	Media-alta
Colombes gravedad	0.300	59%	30	Baja-media

14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

Buceo	0.426	38%	80	Baja
Cumparsita	0.284	39%	130	Baja
Punta Carretas	0.088	23%	80	Baja
Colón	0.055	45%	35	Baja
Miramar	0.024	27%	30	Alta
Guaraní	0.363	34%	150	Baja

Estos valores de infiltración equivalen en promedio a una tasa de 0.047 l/s.km de red.

En promedio, las aguas servidas, provenientes del consumo de agua más los otros aportes (infiltración e ingreso de agua en redes unitarias por bocas de tormenta), son de 340 l/hab.día.

Por otra parte, se analizaron registros diarios (caudal medio diario) para el año 2015 de las estaciones de bombeo costeras para días de tiempo seco, así como para algunas estaciones interiores (Colón, Maroñas), obteniendo valores de máximo diario (K1) de entre 1.35 y 2.67.

Asimismo, se analizaron registros de bombeo instantáneo de las estaciones Colombes, Punta Gorda, Colón, Maroñas, Buceo, Guaraní y Miramar, para ciertos períodos especialmente seleccionados, con frecuencias de toma de datos de hasta 30 segundos, de modo de obtener una curva horaria de bombeo y así estimar el valor de K2 para dichas cuencas.

Los resultados de K1xK2 son mostrados en la siguiente figura, y comparados con los resultado obtenidos mediante la aplicación del criterio establecido en el Plan Director de Saneamiento de Montevideo del año 1995 (PDSM), la fórmula de Harmon y la de Babbitt. La curva que surge se asemeja bastante a la curva determinada por la fórmula de Babbitt.

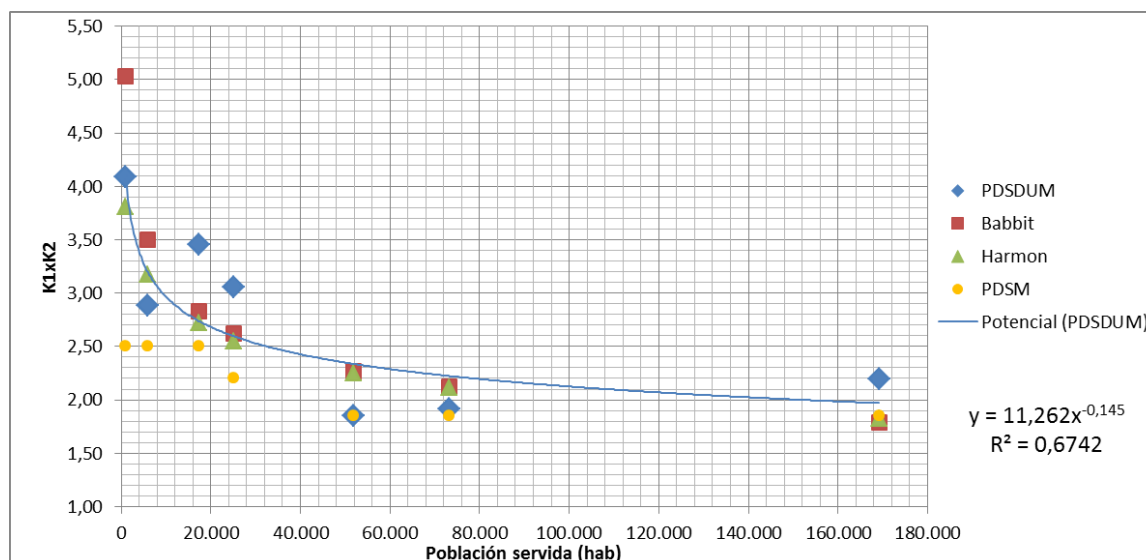


Figura 1: Coeficientes combinados K1xK2 obtenidos por distintos métodos

El análisis de caudales instantáneos en algunas estaciones de bombeo permitió realizar una estimación de los niveles de intrusión pluvial en redes separativas. Las estimaciones para la cuenca de la estación de bombeo Colón se presentan a continuación.

Tabla 3: Datos cuenca Colón



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

Parámetro	Valor
Área cuenca servida (ha)	1056
Viviendas servidas (viv)	17794
Longitud colectores cuenca (km)	140

Tabla 4: Intrusión pluvial en cuenca de la estación de bombeo Colón

Fecha	Precipitación acumulada en la lluvia considerada (mm)	Volumen de lluvia acumulado en la cuenca (m3)	Caudal de tiempo seco que debería bombear la EB (m ³ /s)	Caudal máximo bombeado (m ³ /s)	Caudal máximo de bombeo adicional (m ³ /s)	Duración de bombeo adicional (hs)	Volumen de bombeo adicional (m3)	Área conectada a red cloacal (ha)	% área conectada a red cloacal (%)
13/12/2015 0:00	2.78	29357	0.110	0.350	0.240	6	2592	93	8.8%
14/12/2015 10:00	23.88	252173	0.124	0.430	0.306	21	11567	48	4.6%
12/11/2015 23:00	18.21	192298	0.110	0.330	0.220	12	4752	26	2.5%
09/09/2015 23:00	9.26	97786	0.124	0.290	0.166	12	3586	39	3.7%

Se observa que el cálculo teórico del área conectada a la red cloacal es mayor para el evento de menor precipitación. Esto resulta razonable con la metodología propuesta, pues el área conectada se calcula como el cociente entre el volumen bombeado y el volumen precipitado. Cuanto menor es la lluvia, el volumen bombeado mejor representa el volumen intruido pues una mayor proporción del mismo es efectivamente bombeado; a lluvias mayores el volumen bombeado pierde relevancia respecto al volumen intruido, el cual en mayor medida es vertido y no bombeado.

Asimismo se observa que el caudal bombeado durante la lluvia fue entre 2.5 y 3.5 veces superior al caudal que debería haber sido bombeado en tiempo seco. Estos valores tienen más que ver con la capacidad máxima de bombeo de la estación (que no puede ser mucho mayor que esa) que con el caudal intruido.

Si se asumiese que las viviendas que conectan sus pluviales a la red cloacal lo hacen conectando un área de 60 m²/vivienda (área de techos), las áreas conectadas a la red cloacal que se presentan en la tabla precedente implicarían que un gran porcentaje de las viviendas de la cuenca estaría conectando sus pluviales a la red. Esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5: Viviendas conectadas a la red - Colón

Fecha	Área conectada a red cloacal (ha)	Cantidad de viviendas conectadas (asumiendo 60 m ² de área de aporte por vivienda)	% de viviendas conectadas (asumiendo 60 m ² de área de aporte por vivienda)
13/12/2015 0:00	93	15540	87%
14/12/2015 10:00	48	8073	45%
12/11/2015 23:00	26	4349	24%
09/09/2015 23:00	39	6454	36%

Asimismo, se puede relacionar el caudal máximo bombeado (caudal de aguas servidas más caudal adicional que se bombeó en la estación debido a la intrusión) con el área de la cuenca y a los kilómetros de colector de la misma. Como referencia se menciona que el SEPS establece en sus criterios de diseño la verificación de las redes cloacales con un caudal máximo que al menos contemple una tasa de intrusión de 1.5 l/s/ha y/o 7 l/s/km de colector (esos valores ya incluyen el caudal de aguas servidas).



14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping

Tabla 6: Caudal máximo bombeado - Colón

Fecha	Caudal de tiempo seco que debería bombear la EB (m ³ /s)	Caudal máximo bombeado (m ³ /s)	Caudal máximo bombeado (l/s/ha)	Caudal máximo bombeado (l/s/km)
13/12/2015 0:00	0.110	0.350	0.331	2.5
14/12/2015 10:00	0.124	0.430	0.407	3.1
12/11/2015 23:00	0.110	0.330	0.313	2.4
09/09/2015 23:00	0.124	0.290	0.275	2.1

Nuevamente, este tipo de análisis (de caudales en vez de volúmenes) está muy limitado por la capacidad de bombeo de la estación, la cual nunca podrá bombear más de esos 430 l/s aproximadamente, por lo que no se podrá concluir mucho respecto al caudal máximo registrado en la red por causa de la intrusión pluvial. En cambio, el análisis de volúmenes precipitados y bombeados ofrece una idea más aproximada del grado de conexión clandestina de aguas pluviales, sobre todo cuando la lluvia analizada es relativamente pequeña ya que una mayor parte del caudal intruido puede ser bombeado y por lo tanto es "visible" a los efectos del análisis.

Para la estación de bombeo Maroñas se realizó un análisis similar al de Colón, siendo también las conclusiones también similares.

Tabla 7: Intrusión pluvial en cuenca de la estación de bombeo Maroñas

Fecha	Precipitación acumulada en la lluvia considerada (mm)	Volumen de lluvia acumulado en la cuenca (m ³)	Caudal de tiempo seco que debería bombear la EB (m ³ /s)	Caudal máximo bombeado (m ³ /s)	Caudal máximo de bombeo adicional (m ³ /s)	Volumen de bombeo adicional (m ³)	Área conectada a red cloacal (ha)	% área conectada a red cloacal (%)
12/11/2015 23:00	17.95	64066	0.054	0.13	0.07	1278	7	2.0%

Tabla 8: Viviendas conectadas a la red - Maroñas

Fecha	Área conectada a red cloacal (ha)	Cantidad de viviendas conectadas (asumiendo 60 m ² de área de aporte por vivienda)	% de viviendas conectadas (asumiendo 60 m ² de área de aporte por vivienda)
12/11/2015 23:00	7	1187	13%

CONCLUSIONES

Del análisis de consumos de agua en Montevideo puede inferirse que éstos han aumentado desde el año 2004 al 2011, situándose en promedio en 225 l/dia.hab. Observando las dotaciones de consumo residencial, los valores más bajos se dan en la periferia, y los más elevados en la costa, lo cual resulta razonable.

Del balance de caudales medios en estaciones de bombeo se logró estimar el nivel medio de infiltración en las redes de Montevideo, en 0.088 l/s/ha, siendo esto un 23% del caudal total de aguas servidas.

Respecto a los coeficientes pico de aguas servidas en tiempo seco, se obtuvo una curva de K1xK2 bastante similar a curvas internacionalmente aceptadas.



IX Congreso Nacional de AIDIS
Integrando Cuencas para el Desarrollo Sostenible

14 y 15 de setiembre 2017

Hotel Escuela Kolping



Con relación a la intrusión pluvial, los resultados muestran que, por ejemplo, en Colón al menos un 5% del área de la cuenca tiene sus pluviales conectadas a la red cloacal. Si se asume que las viviendas conectadas clandestinamente tienen en promedio un área de aporte impermeable de 60 m²/vivienda (valor utilizado en varios proyectos de redes de saneamiento en la región metropolitana), esto implicaría que aproximadamente el 50% de las viviendas estarían conectando clandestinamente sus pluviales a la red cloacal. Para los eventos de lluvia analizados (precipitaciones entre 2 mm/h y 12 mm/h) la tasa de intrusión pluvial fue en promedio de al menos 0.22 l/s.ha, siendo el caudal bombeado del orden del triple del caudal de aguas servidas. En todos los eventos, excepto uno, se registraron vertimientos en la propia estación de bombeo, por lo que estos valores, que han sido estimados a partir del caudal bombeado únicamente, establecen mínimos en cuanto a la intrusión pluvial.