

SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO MACOTI

Juan Pablo Romero Yáñez¹

Resumen

El proyecto “Mejoramiento y Ampliación Sistemas de Alcantarillado Sanitario y Agua Potable de la Mancomunidad de Colcapirhua y Tiquipaya”, conocido comúnmente como Proyecto MACOTI, contempla en su diseño la dotación de los servicios básicos de agua potable y alcantarillado sanitario a los municipios de Colcapirhua y Tiquipaya. Es un proyecto de gran envergadura, con un presupuesto de 3`194178,09 \$us. Permitió la realización de los Trabajos Dirigidos de 2 estudiantes de la UPB, uno enfocado a la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas y otro al Sistema de Alcantarillado Sanitario.

En este documento se resume la modelación hidráulica efectuada por parte del Consorcio encargado de la construcción del proyecto, y se repasan los criterios técnicos que permiten evaluar el funcionamiento de un sistema de alcantarillado sanitario.

Palabras-clave: alcantarillado sanitario; fuerza tractiva.

¹ Licenciado en Ingeniería Civil – Universidad Privada Boliviana, juan.pablo.romero@emproltda.com

1 INTRODUCCIÓN

Los antecedentes de este proyecto datan desde el 1994 cuando los municipios de Tiquipaya y Colcapirhua concibieron un proyecto mancomunado de agua y alcantarillado para sus pobladores, una prioridad sentida en común.

En 2001 se concibe el proyecto Mejoramiento de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario Colcapirhua-Tiquipaya (MACOTI). Pese a varios intentos de acercamiento con el Fondo de Inversión Social (FIS), el proyecto no vio la luz hasta el 2004 cuando, durante la gestión municipal del ex alcalde de Tiquipaya Lucio Villazón, se obtuvo un crédito de 3,4 millones de dólares del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por intermedio del Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), para favorecer a los dos municipios mediante la conformación del proyecto Mejoramiento de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario Colcapirhua-Tiquipaya.

La construcción de la obra fue iniciada el 16 de septiembre del 2004 a cargo del consorcio EMPRO-COSICA-IPRECO, que se adjudicó el proyecto por medio de licitación pública.

El Consorcio incorpora a un pasante de la Universidad Privada Boliviana como apoyo al departamento técnico encargado del módulo de alcantarillado sanitario, para las actividades de seguimiento de obra y la realización de una modelación del sistema para evaluar el funcionamiento que tendrá el mismo.

2 METODOLOGÍA

Para realizar el control del funcionamiento adecuado de un Sistema de Alcantarillado Sanitario es importante efectuar una modelación que permita revisar por una parte que los caudales no sobrepasen la capacidad de los colectores y que, por otro parte, exista la capacidad de arrastre suficiente que no permita sedimentación de sólidos. Después de revisar bibliografía sobre ingeniería sanitaria se efectuó una modelación siguiendo los siguientes pasos que se encuentran descritos posteriormente:

- Cálculo de la población.
- Cuantificación de la dotación de agua potable de la población beneficiada.
- Cálculo de caudal de diseño.
- Cálculo de áreas de aporte para definir caudal en los distintos tramos.
- Cálculo de fuerza tractiva.

2.1 Cálculo de la población.

El punto de partida de un proyecto de alcantarillado sanitario es el cálculo de población, por lo que es crucial obtener datos representativos que cuenten con un buen respaldo técnico.

En el proyecto se utilizaron datos de población y tasas de crecimiento del Instituto Nacional de Estadística (Censo 2001). La población que se muestra en la Tabla 1 fue calculada basándose en las siguientes hipótesis:

La construcción del proyecto debió ser concluida el 2005, por lo que para un período de diseño de 20 años, se realizó la modelación hasta el año 2025.

Colcapirhua y Tiquipaya tienden a formar parte de la Zona Metropolitana de Cochabamba, por lo que se toma en cuenta que el comportamiento del crecimiento poblacional parte desde el último dato del INE, con un decremento anual hasta llegar a la tasa de crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana de Cochabamba.

Como recomienda la norma NB 688 para poblaciones de esta índole, se utiliza el método de crecimiento exponencial:

$$Pf = Po e^{n \frac{r}{100}} \quad (1)$$

donde Pf: Población final [hab], Po: Población inicial [hab], n: Período de tiempo [años] y r: Tasa de crecimiento anual [%]

Tabla 1 - Población de Colcapirhua y Tiquipaya

Nro	Año	Índice de crecimiento		Población	
		Colcapirhua	Tiquipaya	Colcapirhua	Tiquipaya
	2001	6.78	4.61	36410	26730
	2002	6.58	4.47	38965	27992
	2003	6.38	4.34	41614	29273
	2004	6.19	4.21	44356	30571
0	2005	6.00	4.08	47188	31885
1	2006	5.82	3.96	50108	33214
2	2007	5.65	3.75	53112	34556
3	2008	5.48	3.75	56198	35877
4	2009	5.31	3.75	59363	37248
5	2010	5.15	3.75	62603	38672
6	2011	5.00	3.75	65915	40150
7	2012	4.85	3.75	69295	41685
8	2013	4.70	3.75	72739	43278
9	2014	4.56	3.75	76243	44932
10	2015	4.43	3.75	79803	46649
11	2016	4.29	3.75	83415	48432
12	2017	4.16	3.75	87075	50283
13	2018	4.04	3.75	90778	52205
14	2019	3.92	3.75	94521	54200
15	2020	3.75	3.75	98299	56272
16	2021	3.75	3.75	102056	58423
17	2022	3.75	3.75	105956	60656
18	2023	3.75	3.75	110005	62974
19	2024	3.75	3.75	114209	65381
20	2025	3.75	3.75	118574	67880

2.2 Cuantificación de la dotación.

Otro dato de gran importancia al momento de cuantificar el aporte de aguas servidas con el que funcionará el sistema de alcantarillado sanitario es la dotación de agua en el sector. El boletín No 73 de la CGIAG (Comisión para la Gestión Integral de Agua en Bolivia) presenta un informe donde cuantifica la dotación de agua de los distintos sistemas de agua potable en Colcapirhua y Tiquipaya en **80 l/hab/día**.

2.3 Cálculo del caudal de diseño.

Contando con los datos de población para un determinado período de diseño y la dotación de agua, se utilizan los siguientes criterios para el cálculo de caudal:

2.3.1 Coeficiente de retorno

Este coeficiente toma en cuenta que no toda el agua consumida en un domicilio es devuelta al alcantarillado, debido a sus múltiples usos como riego, lavado de piso, cocina y otros. El valor de este coeficiente oscila entre el 60% y el 80%.

Considerando las costumbres de la población en los municipios de Colcapirhua y Tiquipaya, se determina para la modelación del proyecto MACOTI que de la dotación de agua el **70 % es devuelto al alcantarillado**, siendo el resto utilizado en riego, lavado de pisos, cocina y otros.

2.3.2 Caudal medio diario de aguas residuales

El caudal medio diario de aguas residuales se define a partir de la cuantificación del aporte del consumo de agua potable:

$$Qm = \frac{P \cdot Dot \cdot Cr}{86400} \quad (2)$$

donde Qm: Caudal medio diario [l/s], P: Población [hab], Dot: Dotación [l/hab/día] y Cr: Coeficiente de retorno [fracción]

2.3.3 Caudal máximo horario de aguas residuales

El caudal máximo horario se determina utilizando factores de mayoración del caudal medio diario obtenido anteriormente. En el proyecto se utiliza el coeficiente de mayoración M, llamado coeficiente de Harmon.

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (3)$$

donde P: Población en miles.

Por lo que:

$$Qmaxh = M \cdot Qm \quad (4)$$

2.3.4 Caudal de conexiones erradas

En los caudales de aguas residuales se deben considerar los caudales provenientes de las conexiones erradas, según la norma NB 688 es necesario fijar un coeficiente de seguridad del 5 al 10 % del caudal máximo previsto de aguas residuales. **En el proyecto se toma un coeficiente de seguridad del 5 % del caudal máximo, para los caudales provenientes de las conexiones erradas.**

2.3.5 Caudal de infiltración

No se puede evitar la infiltración de aguas subterráneas a través de fisuras en los colectores, juntas mal ejecutadas, en la unión de colectores con las cámaras de inspección y en las mismas cámaras de inspección cuando permiten la infiltración del agua.

Los valores de coeficiente de infiltración recomendados por la norma se muestran a continuación.

Tabla 2 - Coeficientes de infiltración l/s/m

Unión	Tubo de cemento		Tubo de arcilla		Tubo de arcilla vitrificada		Tubo de PVC	
	Cemento	Goma	Cemento	Goma	Cemento	Goma	Pegamento	Goma
N. Freático bajo	0,0005	0,0002	0,0005	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,00005
N. Freático alto	0,0008	0,0002	0,0007	0,0001	0,0003	0,0001	0,00015	0,0005

Tomando en cuenta que para tubería PVC, unión de goma y nivel freático alto, el coeficiente propuesto por la norma es demasiado conservador (0,0005 l/s), pues en la actualidad la hermeticidad de las uniones de tubería es cada vez más efectiva, se asume un valor de 0,0001 l/s/m

El caudal de infiltración del proyecto, considerando que existen 140 Km de red (100 km del proyecto MACOTI y 40 km de sistemas existentes), es:

$$Q_{inf} = 140\ 000 \times 0,0001 \quad (5)$$

$$Q_{inf} = 14\ l/s \quad (6)$$

2.3.6 Caudal de diseño

El cálculo del caudal de diseño es el punto más importante de la modelación, pues de un cálculo adecuado depende la calidad de los resultados posteriores. El caudal de diseño se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q_d = Q_{maxh} + Q_{conex} + Q_{inf} \quad (7)$$

donde Q_d : Caudal de diseño [l/s], Q_{maxh} : Caudal máximo horario [l/s], Q_{conex} : Caudal de conexiones erradas [l/s] y Q_{inf} : Caudal de infiltración [l/s]

El cálculo de caudal para el año 2025 se encuentra detallado en la siguiente tabla:

Tabla 3 - Cálculo de caudal para el 2025

20 AÑOS

MUNICIPIO	POBLACION INICIAL	POBLACION FINAL
	2005 [hab]	2025 [hab]
COLCAPIRHUA	47,188	118,574
TIQUIPAYA	31,885	67,880
TOTAL	79,073	186,454

Período de diseño [años]:	Dato	20
Coefficiente de retorno:	Dato	0,7
Coefficiente de punta:	$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}$	1,79
Dotación 2008 [l/hab/día]	Dato	80
% Abastecimiento de agua	Dato	100
Variación anual de dotación [%]:	Dato	2
Dotación final [l/hab/día]:	$d + ((a-3) * d * f/100)$	107,2
Caudal medio diario [l/s]:	$(e/100) b * P_{ob} * g / 86400$	162
Caudal máximo horario [l/s]:	$c * h$	290
Caudal por conex. erradas [l/s]:	$0,05 * i$	14,5
Coefficiente de infiltración [l/s/m]	Dato	0,0001
Longitud aprox. De la red [m]	Dato	140000
Caudal de infiltración [l/s]	$k * l$	14
Caudal de diseño [l/s]:	$i + j + 1$	319
Caudal de diseño [m ³ /s]:	$n / 1000$	0,319

2.4 Cálculo de áreas de aporte

Una de las formas más prácticas de determinar los caudales para el diseño de cada tramo y cada colector, es hacer una repartición del caudal total del proyecto en función de su área. Al delimitar luego el área a servir por cada tramo podemos obtener el caudal correspondiente.

Por medio de imágenes satelitales, se calculó que el área total de la población beneficiada del proyecto es de 1883,31 Ha. De este modo se obtiene el siguiente caudal unitario para el año 2025:

$$Q_{unit} = \frac{319}{1883.31} = 0,17 \text{ l/s/Ha} \quad (8)$$

2.5 Cálculo de fuerza tractiva.

La fuerza tractiva o tensión de arrastre, es el esfuerzo tangencial unitario ejercido por el líquido sobre el colector y, en consecuencia, sobre el material depositado.

La fuerza tractiva es función del líquido que escurre en la tubería (peso específico), del radio hidráulico y de la pendiente como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\tau = \delta \times R \times S \quad (9)$$

donde τ : Fuerza tractiva [kg/m²], δ : Peso específico del líquido [kg/m³], R: Radio hidráulico [m] y S: Pendiente [m/m]

Para evitar la sedimentación, la fuerza tractiva debe superar la resistencia del sedimento al movimiento, para cerciorarse de que esto pase, la norma NB 688 aconseja un valor **mínimo de fuerza tractiva de 1 Pa (0,1 kg/m²)**.

Para poder efectuar el cálculo de la fuerza tractiva se debe considerar las ecuaciones de flujo:

En **canales abiertos** la ecuación de flujo utilizada en el proyecto es la de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}, \quad Q = \frac{1}{n} \frac{R^{\frac{2}{3}}}{A} S^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

donde V: Velocidad [m/s], n : Coeficiente de rugosidad [adimensional] (0,009 para PVC y 0,0013 para Hormigón), R: Radio hidráulico [m] y S: Pendiente [m/m]

La ecuación deducida para el cálculo del *caudal a tubo lleno* a partir de la fórmula de Manning es la siguiente:

$$Q_{ll} = \frac{0,312 D^{8/3} S^{1/2}}{n} \quad (11)$$

donde Q_{ll} : Caudal a tubo lleno [m³/s], n : Coeficiente de rugosidad [adimensional] (0,009 para PVC y 0,0013 para Hormigón), D: Diámetro [m] y S: Pendiente [m/m].

La ecuación de *Continuidad*:

$$Q = V \times A \quad (12)$$

donde Q: Caudal [m³/s], V: Velocidad [m/s] y A: Área de la sección circular [m²]

Las características geométricas para tuberías con sección parcialmente llena se muestran a continuación:

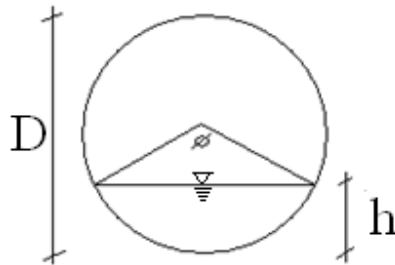


Figura 1 – Características geométricas en una tubería a sección parcialmente llena

El ángulo interior θ en grado sexagesimal.

Ángulo interior:

$$\theta = 2 \cos^{-1}\left(1 - \frac{2h}{D}\right) \quad (13)$$

Tirante:

$$h = \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \times \frac{D}{2} \quad (14)$$

Área mojada:

$$A = \frac{D^2}{8} \left(\frac{2\pi}{360} \theta - \text{sen} \theta \right) \quad (15)$$

Perímetro mojado:

$$PM = \frac{\pi}{360} \theta D \quad (16)$$

Radio Hidráulico:

$$R = \frac{\text{Área mojada}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (17)$$

$$R = \frac{D}{4} \left(1 - \frac{360 \text{sen} \theta}{2 \pi \theta}\right) \quad (18)$$

Una herramienta muy útil para el cálculo de la fuerza tractiva es generar una tabla de relaciones hidráulicas, ver Tabla 4, con las ecuaciones de flujo revisadas que relacionan las características hidráulicas a sección parcialmente llena con la sección llena. De esta manera, definido un diámetro y pendiente de un tramo, se puede calcular el caudal a tubo lleno (Q) y, por medio del caudal unitario y el área de aporte, se puede encontrar el caudal del tramo (q),

luego, de la tabla se obtiene el ángulo interior, posteriormente se calcula el Radio Hidráulico y finalmente, con ese dato, la fuerza tractiva.

Tabla 4 - Relaciones hidráulicas de la sección circular.

h/D	θ [rad]	θ [grados]	Radio hydr [r]	r/R	a/A	v/V	q/Q
0.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.10	1.287002	73.739795	0.063520	0.254081	0.052044	0.401157	0.020878
0.20	1.854590	106.260205	0.120591	0.482365	0.142378	0.615060	0.087571
0.30	2.318559	132.843643	0.170941	0.683764	0.252316	0.776135	0.195831
0.40	2.738877	156.926082	0.214226	0.856905	0.373530	0.902170	0.336988
0.50	3.141593	180.000000	0.250000	1.000000	0.500000	1.000000	0.500000
0.60	3.544308	203.073918	0.277644	1.110577	0.626470	1.072422	0.671840
0.70	3.964626	227.156357	0.296235	1.184939	0.747684	1.119774	0.837238
0.80	4.428595	253.739795	0.304193	1.216773	0.857622	1.139742	0.977467
0.90	4.996183	286.260205	0.298037	1.192147	0.947956	1.124311	1.065797
1.00	6.283185	360.000000	0.250000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

3 RESULTADOS OBTENIDOS

Se encontró una variación significativa en el cálculo del caudal de diseño por dos motivos importantes:

1. El cálculo de la proyección de población en el proyecto original tomaba en cuenta una tasa de crecimiento que se aminoraba hasta estabilizarse en la tasa de crecimiento de la zona metropolitana de Cochabamba, sin embargo, se aplicó la fórmula de proyección exponencial a 20 años como si la tasa de crecimiento fuera constante, ese error disminuye la vida útil del proyecto de 3 a 4 años.
2. El caudal por infiltración no toma en cuenta a las redes existentes que se incluirán en el sistema, por lo que se omite alrededor de 40 km de tubería tendida.

4 CONCLUSIONES

Después de realizar la modelación de colectores principales, interceptores y emisario final, se observó que algunos colectores principales presentarán problemas por colmatación durante las horas pico de uso y otros, debido a la pequeña fuerza tractiva, requerirán de operaciones periódicas de mantenimiento para evitar obstrucciones por retención de sólidos.

5 REFERENCIAS

JOSE M. DE AZEVEDO NETTO, **Soluções apropriadas**, 1986

Instituto nacional de estadística, **Indicadores Socio demográficos**, Bolivia, 2002

Dirección General de Saneamiento Básico, **Norma Boliviana NB 688 Instalaciones sanitarias – alcantarillado sanitario, pluvial y tratamiento de aguas**, 2001

ARMANDO ESCALERA, **Texto Base de Ingeniería Sanitaria**. UMSS, 2003

Comisión para la Gestión Integral de Agua en Bolivia, **Todo sobre el agua – Boletín 73**, 2007