

Estimación de las pérdidas por filtración y el coeficiente de rugosidad en el canal de Albear

INTRODUCCIÓN

Acorde con García y otros⁹, al ingeniero Francisco de Albear en 1850 se le encomendó realizar los estudios necesarios para el abasto de la ciudad y demostró su capacidad e inteligencia al proponer captar las aguas de un gran número de manantiales que brotaban en las cercanías de un lugar conocido como Vento, sobre el río Almendares. El proyecto estaba constituido por: depósito de captación y reunión de los manantiales; obras en la cañada de Vento; presa; canal de toma y derivación; casa y estanque de compuertas y maniobras de los sifones del paso del río; canal de conducción prismático; depósito de almacenamiento y red de distribución. Casi treinta años después (1878), a causa de la lentitud con la cual marchaban las obras debido a la escasez de fondos y la situación política del país (la Primera Guerra de Independencia), se decidió entregar a los vecinos de la ciudad, mediante el acueducto ya existente Fernando VII, unos 5 000 m³ diarios de los 150 000 captados de los manantiales de la taza de Vento. La obra fue concluida en 1893, 45 años después de comenzada y Albear fallece el 23 de octubre de 1887 sin haber visto terminada su obra maestra.

Importancia del Acueducto de Albear en el Abastecimiento a Ciudad de La Habana

El Acueducto de Albear es la más antiguo de los acueductos de Ciudad de La Habana, actualmente es gestionado por la empresa Aguas de la Habana, incorporando sus aguas al sistema Central. Consta de dos captaciones por gravedad denominadas Taza Grande y Taza Chica, así como de un pozo profundo habilitado con su equipo de bombeo, el cual actualmente no está en explotación, solo es utilizable en época de sequía, extrayéndose desde él 150 l/s e incorporándose al canal conduciéndolas junto con la de ambas tazas por gravedad hasta los tanques de

Resumen / Abstract

El canal de Albear, conducción del acueducto del mismo nombre, tiene más de un siglo de explotación continua como fuente de la ciudad de La Habana. Antes de su rehabilitación capital, efectuada en el 2001, presentó serios problemas por su edad y la falta de un mantenimiento sistemático. En este trabajo se resolvió numéricamente la ecuación de flujo permanente y espacialmente variado por el método de Runge-Kutta, acoplado a un algoritmo de búsqueda local para la identificación de parámetros. Los resultados fueron contrastados con el modelo HEC-RAS, con un balance favorable al procedimiento empleado.

Palabras Clave: canal de Albear, coeficiente de rugosidad, pérdidas por filtración.

The Albear channel, conduction element of the aqueduct with the same name, has more than one century of continuous operation as a water source of Havana City. The channel presented, before rehabilitation performed in 2001, serious problems due to its age and the lack of a systematic maintenance. In this work, the equation for steady and spatially varied flow was solved numerically by the method of Runge-Kutta, coupled with an algorithm of constrained local search for parameter identification. The results were compared with the model HEC-RAS, with a balance favouring the proposed procedure.

Keywords: Albear channel, roughness coefficient, filtration

Palatino. La Taza Grande es la obra principal y más antigua; capta un grupo de manantiales que se encuentran aislados del río Almendares mediante un muro de hormigón armado y entrega sus aguas a un canal que cruza el río Almendares desde la margen izquierda hacia la derecha mediante un sifón invertido, conduciendo sus aguas por gravedad a través de un conducto de sección ovoide, hasta los tanques de Palatino con capacidad de 60000 m³.

El Canal de Albear se le considera una obra maestra de la hidráulica en Cuba, es Patrimonio Nacional y constituye una de las 7 maravillas de la ingeniería cubana⁹. Actualmente se encuentra en explotación a más de un siglo de su construcción. Junto a otras fuentes de abasto, sus aguas llegan a los 5 municipios del centro de la capital entregando un promedio mensual de 5,286.24 hm³. Su aporte representa el 21% del volumen total anual que tributa el resto de las captaciones que gestiona Aguas de la Habana y el 12.23 % del agua potable que consume la población de Ciudad Habana, por lo que influye significativamente en el volumen total de entrega a la ciudad². Su captación a partir de manantiales y su conducción por gravedad, implica la no utilización de equipos de bombeo, garantizando un ahorro energético de consideración. Sus aguas son de magnífica calidad y solo necesitan una simple cloración con cloro gas³.

Debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos de la Cuenca de Vento en años anteriores, los niveles dinámicos de las aguas subterráneas han descendido, sobre todo cuando ocurren períodos de sequía. Este fenómeno incide directamente en los volúmenes de agua que entregan los manantiales de Vento, llegando en ocasiones a secarse totalmente la Taza Chica. Este fenómeno ha llegado a reducir la entrega del agua en un 50% a los Tanques de Palatino, trayendo como consecuencia grandes afectaciones en el servicio².

Problemas fundamentales presentados en la explotación del canal de Albear

El canal ha presentado serios problemas debido al paso de los años y la falta de un mantenimiento sistemático; entre ellos podemos citar: el estrangulamiento natural del conducto, agrietamiento de la estructura de la cúpula, inoperatividad de las casas de compuertas, penetración y crecimiento de raíces, pérdidas de agua por filtración y no estanqueidad de los elementos de regulación (véase Apéndice I). También se pueden citar otras deficiencias como la existencia de un puente-canal en el cruce del río Oregón construido en 1926 en sustitución del sifón original, el cual provocaba el remanso de las aguas del río, causando serias inundaciones en la zona¹. El impacto de estos problemas en el comportamiento hidráulico del canal no pudo ser evaluado en su momento por la escasez de mediciones y aunque éstas existieran, no fueron

introducidas herramientas computacionales que permitieran de una manera eficiente estimar las pérdidas por filtración y el coeficiente de rugosidad en toda su longitud.

Para dar solución a las afectaciones producidas en toda la sección del canal a lo largo de su trazado, fue sometido a una rehabilitación capital en el 2001, donde se inyectaron con bentonita y mortero las grietas y orificios por donde se producían las filtraciones, estucando y revisitando totalmente su sección de conducción. El puente canal sustituyendo éste por un sifón invertido de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) de 900 mm de diámetro en sustitución del puente canal y se restauró además el antiguo sifón de Albear. Después de concluidos estos trabajos, aún existen deficiencias latentes que quedaron sin solución, entre ellos se pueden citar: obstrucción de la sección de aforo ubicada antes de Torre 17 por la ubicación de un tramo de puente vial sobre la misma, inoperatividad de las compuertas de la Taza Chica falta de estanqueidad en las compuertas del tanque provocando fugas de aguas del mismo, falta de secciones de aforo a lo largo de la conducción que permitan estimar el caudal de circulación y los tirantes a lo largo de la misma, ausencia de medición en ambas tazas que permitan el conocimiento del comportamiento de los niveles en las mismas, carencia de estudios que permitan conocer el comportamiento hidráulico del flujo en el canal ante la presencia de estructuras nuevas como el sifón de PRFV así como de la influencia del remanso, provocado por la variación de los niveles del tanque, sobre el caudal de salida del canal, etc¹.

Como se ha planteado con anterioridad, no se puede hablar de una explotación correcta en el canal de Albear, así como de la confección de un plan del uso del agua, el establecimiento y aprovechamiento de las normas de consumo para su confección y de todas las demás planificaciones ligadas al abasto si se desconoce la cantidad de agua que se entrega a un consumidor en un intervalo de tiempo determinado ya que no existen estaciones de aforo suficientes debidamente calibradas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ecuaciones gobernantes

Tal y como sustentan autores^{6,19}, las ecuaciones que gobiernan el régimen de flujo impermanente, unidimensional y espacialmente variado pueden ser planteadas formalmente como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + q = 0 \quad (1.a)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1-F^2) \frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f - S_e + D_q - \frac{Q}{A^2g} q \quad (1.b)$$

Como es costumbre g = aceleración de la gravedad (9.81m/s²); x,t = variables de espacio y tiempo;

$h(x,t)$ = profundidad de circulación; $A(x,t)$ = área mojada;

$Q(x,t)$ = gasto ó caudal de circulación; $F(x,t)$ = número de

Froude, $F^2 = \frac{Q^2 T}{g A^3}$ siendo $T(x,t)$ = ancho superficial; $S_o(x)$ =

pendiente del fondo de la conducción; $S_f(x,t)$ = pendiente de fricción, en la cual puede ser introducida una ley de resistencia característica de la conducción, la cual siempre se opone al movimiento, tal y como ha sido propuesto por

Martínez y Cabrera (2004) en la forma $S_f = \frac{Q|Q|n^2}{R^{2m+1}A^2}$,

siendo $R(x,t)$ = radio hidráulico, $n(x)$ = coeficiente de rugosidad y $m(x)$ = exponente (ej. ecuación de Manning $m = 1/6$); $S_e(x,t)$ = pendiente de energía a través

de corrientes de eddy la cual se relaciona con el cambio en la carga a velocidad según $S_e = \frac{k_e}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2$, $k_e(x)$ =

coeficiente de expansión o contracción longitudinal adimensional, $k_e < 0$ para una expansión (donde $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 < 0$) y $k_e > 0$ para una contracción; $q(x,t)$ = aporte ($q < 0$) o descarga lateral ($q > 0$).

El término $D_q(x,t) = 0$ cuando existe una descarga lateral volumétrica (ej. vertedor lateral); $D_q(x,t) = \frac{Q}{2A^2g} q$ cuando se analiza una descarga por filtración y finalmente

$Dq(x,t) = \frac{(V - v_x)}{Ag} q$ en presencia de aporte lateral hacia la conducción, siendo $V(x,t)$ = velocidad media de circulación y $v_x(x,t)$ = componente de la velocidad del aporte lateral en el eje de la conducción.

La ecuación (1.a) es exacta en una conducción rugosa de forma y alineamiento arbitrarios. La ecuación (1.b) puede ser modificada, desarrollando el término para asignarle más relevancia a la variación longitudinal del área mojada, resultando:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + (2 - k_e) \frac{Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + [1 - (1 - k_e) F^2] \frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f + D_q - \frac{Q}{A^2g} q \quad (1.c)$$

Si se supone que la componente de la velocidad de los aportes laterales $v_x = 0$, lo cual equivale a plantear que los aportes son perpendiculares al eje de la conducción, entonces la ecuación (1.c) puede ser rescrita formalmente como:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + (2 - k_e) \frac{Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + [1 - (1 - k_e) F^2] \frac{\partial h}{\partial x} = S_o - \frac{Q|Q|n^2}{R^{2m+1}A^2} + (\varphi - 1) \frac{Q}{A^2g} q \quad (1.d)$$

donde el parámetro $j = 0$ en caso de descarga lateral volumétrica, $j = 0.5$ en presencia de descarga por filtración y $j = 1$ para aportes laterales hacia la conducción.

En un régimen de flujo permanente y espacialmente variado, $\partial A/\partial t = 0$ y $\partial Q/\partial t = 0$ por lo tanto el sistema de ecuaciones (1) puede ser formalmente escrito como:

$$\frac{dQ}{dx} + q = 0 \quad (2.a)$$

$$(2 - k_e) \frac{Q}{A^2g} \frac{dQ}{dx} + \left[1 - (1 - k_e) \frac{Q^2 T}{g A^3} \right] \frac{dh}{dx} = S_o - \frac{Q^2 n^2}{R^{2m+1} A^2} + (\varphi - 1) \frac{Q}{A^2g} q \quad (2.b)$$

La ecuación (2.a) puede ser integrada fácilmente resultando una ecuación del tipo:

$$Q(x) = Q(x_o) - \int_{x_o}^x q(x) dx \quad (3.a)$$

En la ecuación (3.a) puede ser aplicado el teorema del valor medio sobre la función $q(x)$ en el intervalo $\Delta x = x - x_o$ lo que introduce una simplificación notable en (3.a), de donde se desprende fácilmente que:

$$Q(x) = Q(x_o) - \bar{q}(x - x_o) \quad (3.b)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_o}^x q(x) dx \quad (4)$$

Ahora bien, al sustituir (3.a) o (3.b) en (2.b), resulta la siguiente ecuación diferencial ordinaria, capaz de describir el perfil de flujo en régimen permanente y espacialmente variado, con la presencia de aportes y/o descargas laterales:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_o - \frac{Q^2 n^2}{R^{2m+1} A^2} + (\varphi + 1 - k_e) \frac{Q}{A^2g} \bar{q}}{1 - (1 - k_e) \frac{Q^2 T}{g A^3}} \quad (5)$$

La ecuación (5) recibirá información sobre los aportes o extracciones, ya sean puntuales y/o distribuidos en el tramo analizado

La Función Objetivo

El problema inverso generalmente es un problema mal planteado^{16,17}, ya que es posible la no-unicidad e inestabilidad de los parámetros identificados. Existen varios errores asociados a este tipo de problemas, los cuales lo convierten en un problema de difícil solución. Estos errores pueden ser en la medición de tirantes y flujos, por efecto de escalamiento, de interpolación, debido a incertidumbres en los valores puntuales conocidos de los parámetros y en las condiciones de frontera.

Es práctica común en los estudios de identificación de parámetros, hacer uso de la minimización del error cuadrático como un criterio para determinar el conjunto de parámetros óptimos:

$$\min_{\Theta} F(\Theta) \quad F(\Theta) = \sum_{i \in N_o} (h_i^o - h_i)^2 \quad (7)$$

sujeto a $\Theta_i \leq \Theta \leq \Theta_s$, siendo Θ = vector de los parámetros, que en el presente trabajo se consideran N componentes, siendo N el número de subintervalos en que se divide el tramo de conducción analizada, Θ_i = vector de las cotas inferiores de los parámetros, Θ_s = vector de las cotas superiores de los parámetros, N_o = número nodos con observaciones, h_{oi} = valores observados de las profundidades de circulación y h_i = valores calculados.

Aproximaciones numéricas

En la presente contribución, la ecuación (3) es una ecuación diferencial ordinaria, la cual puede ser resuelta utilizando una de las variantes del método de Runge-Kutta, descrito en detalle⁵ e implementado en MATLAB a través de la función ODE45, la cual resuelve ecuaciones diferenciales ordinarias de orden medio, aplicando el método de Runge-Kutta de quinto orden de precisión¹³. Para encontrar los parámetros deseados se hace uso de la función CONSTR, la cual encuentra el mínimo de una función de varias variables sujeta a restricciones de cota empleando el método de Newton. Las restricciones vendrán dadas por la naturaleza de los parámetros n y m. En el caso del parámetro n, éstas podrán escogerse en función del tipo de material a partir de tablas, anteriores calibraciones, etc., y en el caso de m, a partir del rango obtenido de las experimentaciones de Bazin^{11,12}.

Propiedades geométricas de la sección transversal del canal de Albear

El canal de conducción de las aguas captadas en Vento presenta una geometría no rectangular, revestido y cubierto con bóveda. Presenta una longitud aproximada de 9 km (8894.57 metros) entre Vento y los depósitos de almacenamiento en Palatino y una pendiente promedio es de 0.0002. La complejidad de su representación es tal que amerita algunas líneas dentro de la presente sección. La sección del canal es el resultado de la intersección de cuatro circunferencias con diferentes radios y centros, poniéndose así en evidencia el ingenio Albear a través de sus elevados conocimientos de geometría analítica plana. La fundamentación del tipo de conducción está explícitamente declarada^{9,17} y entre las razones que llevaron al Albear a su selección se pueden citar las desventajas sanitarias de un canal sin revestir, ventajas en la calidad del agua, así como que un canal revestido y cubierto, bien construido no requería de reparaciones continuas.

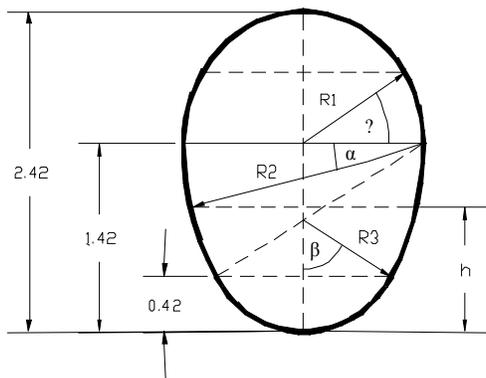


Figura 1. Representación geométrica y dimensiones de la sección transversal del canal de Albear

Las propiedades geométricas (Área mojada A y Perímetro mojado P) han sido formuladas analíticamente¹⁷ en función de la profundidad de circulación. Resulta oportuno destacar que la sección de dicho canal por ser ovoide, se desarrolla a partir de tres radios cuyas magnitudes son $R_1 = 1.0$ m, $R_2 = 2.0$ m y $R_3 = 0.84$ m tal y como se muestra en la Figura 1. La complejidad matemática se hará evidente para el lector por la necesidad de dividir dicha sección en tres desarrollos geométricos con características diferentes.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Estudio del comportamiento hidráulico del canal

La investigación concerniente a la evaluación hidráulica del canal de Albear que los autores han consultado, está basada en un estudio sobre los ciclos de agua en La Habana³⁰. El estudio se sustenta sobre la base de las mediciones efectuadas el día 27 de marzo de 1996. Fueron vertidos 2 tanques de salmuera en la Torre Norte con un peso de sal de 112 kg a las 10:00 am. El caudal medido en la cabecera del canal, con muy poca variabilidad entre las 5:30 am y 12:00 m, fue de 1.189 m³/s determinado con equipos portátiles de medición Digisonic-P de la firma Ultraflux. Las observaciones del paso de la sal se hicieron en 5 puntos que caracterizaron el estacionado a lo largo del canal, determinando el tirante de circulación, así como el tiempo transcurrido en trasladarse la sal entre cada punto. Una de de las alternativas para estimar el caudal de circulación en dichos puntos fue la aplicación del método de adición de masa, conocido también como método de las diluciones comparadas¹⁸. Algunos de los resultados se muestran a continuación.

TABLA 1: RESULTADOS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CAUDAL

Estacionado	Distancia (m)	Tirante (m)	Caudal (m ³ /s)
Torre Norte *	0	1.11	1.189
Torre Cuadrada	628.16	1.12	1.173
Torre 12	4417.35	1.12	1.154
Torre 18	6026.32	0.93	1.237
Torre 22	7751.04	1.02	1.116
Depósitos de Palatino	8894.57	0.74	1.120

* Caudal medido con equipos portátiles de medición, T: Torre Tomado de Rodríguez, T; Alfonso, E; Alfonso, José L. (1996): Estudio sobre los ciclos del agua en La Habana.

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la estimación del caudal efectuada en Torre 18 presenta una nota-

ble desviación de la tendencia marcada por el resto de la serie de caudales. A pesar de esto¹⁸, con el objetivo de cuantificar la eficiencia del canal de Albear, realizaron una estimación de las pérdidas por filtración en dicha conducción, las cuales en ciertos tramos resultaron negativas, lo cual fue interpretado como una presencia de aportes aparentes hacia la conducción. Los autores del presente trabajo concuerdan¹⁸ en que tal comportamiento de las pérdidas no es lógico si se toma en cuenta la no incorporación de agua al canal de otro origen pues el agua se mantuvo con una composición química constante.

TABLA 2 PÉRDIDAS DE AGUA A LO LARGO DEL CANAL

Tramo	Pérdida (l/s)	Índice (l/s/km)
T. Norte a T Cuadrada	15	27.8
T. Cuadrada a T-12	23	5.9
T-12 a T-18	51	3.04
T-18 a T-22	33	18.9
T-22 a Depósito de Palatino	-33	-27
Total	89	9.8

Tomado de Rodríguez, T; Alfonso, E; Alfonso, José L. (1996): *Estudio sobre los ciclos del agua en La Habana.*

Un momento importante de esta campaña de medición constituye las mediciones efectuadas en el depósito Oeste de Palatino. Es válido destacar que existen dos depósitos (Este y Oeste), los cuales presentan una relación de lados igual a 2 y una profundidad de 6.25 m con una capacidad de 31 000 m³, tal como se reporta⁹. A partir de las 10:05 am se comenzaron a observar los niveles del depósito Oeste cada 15 minutos, evaluando el caudal de entrada mediante la variación del volumen en función del tiempo¹⁸. En la figura 2 se observa la variación de la profundidad en dicho depósito y la estimación del caudal de entrada a partir de tales mediciones.

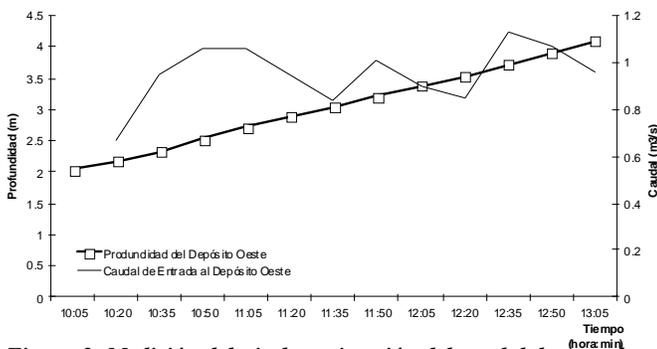


Figura 2. Medición del nivel y estimación del caudal de entrada al depósito Oeste de Palatino.

Tal y como se expone en la figura 2, la tendencia del incremento de la profundidad del depósito en el intervalo de tiempo considerado parece indicar poca incorporación

de ruido a las mediciones; sin embargo, deberá tomarse en cuenta que pequeñas variaciones de la profundidad en el depósito han aportado variaciones en la estimación del caudal de entrada a éste. En la figura 2 puede observarse claramente que la variación del caudal presenta un comportamiento notablemente oscilante para valores entre 0.671 m³/s y 1.124 m³/s. Entre los parámetros estadísticos de esta serie temporal finita se encuentran: el caudal promedio $m = 0.954$ m³/s, la varianza $s^2 = 0.016$ y el coeficiente de variación con respecto a la media $CV = 0.133$.

Como ya se mencionó, el caudal medido en la cabecera del canal (Torre Norte) aportó muy poca variabilidad temporal, todo lo cual sugiere que la variación del caudal registrada en el depósito Oeste de Palatino debería comportarse de forma análoga. Sin embargo, la dispersión de esta medición aporta desviaciones con respecto a la media superiores al 10%, lo cual introduce incertidumbres no deseadas en la estimación de la eficiencia por conducción del canal en el escenario reportado¹⁸.

Análisis y filtrado de las mediciones

En todo proceso de medición se cometen incertidumbres, las cuales en función de su magnitud, pueden atentar contra la calidad de los resultados esperados. Cuando esto ocurre, tal y como se sugiere¹⁵, es sumamente ventajoso llevar a cabo un análisis residual de las mediciones. Los residuos son los valores que se desvían del comportamiento esperado producto del ruido presente en las mediciones, y se les puede atribuir un carácter aleatorio. Al ser separado el ruido, de manera que la medición sea afectada lo menos posible, se establece la acción de filtrar, que no es más que la selección de datos para configurar determinada información. La estrategia de filtrado que ha sido empleada por los autores se soporta sobre el algoritmo LOESS, el cual ha sido seleccionado porque su principal robustez es que no se requieren datos uniformemente espaciados. Tal y como se reporta¹³, este procedimiento es un algoritmo de ajuste y eliminación de ruidos que realiza una serie de ajustes mínimos cuadráticos ponderados por los datos, a partir del siguiente modelo:

$$y_i = g(x_i) + \epsilon_i \tag{9}$$

donde y_i = la i -ésima medición de la respuesta y , x_i = la correspondiente medición x_i del vector x de p predictores, g = función de regresión y ϵ_i = error aleatorio. La idea de la regresión local es que en la vecindad de $x = x_0$, la función de regresión $g(x)$ puede ser localmente aproximada por el valor de una función en alguna clase paramétrica especificada, tal y como se ha reportado⁷.

En el método LOESS, son usados mínimos cuadrados ponderados para ajustar funciones lineales o cuadráticas de los predictores al centro de las vecindades. Los radios de cada vecindad son escogidos⁷ de manera tal que dichas vecindades contengan un porcentaje específico de los da-

tos puntuales. La fracción de los datos, en cada vecindad local, controla la suavidad de la función estimada y no se requieren datos uniformemente espaciados. Este algoritmo utiliza una función de ponderación tricúbica w_i la cual da un peso mayor en la vecindad de los puntos y toma la forma:

$$w_i = \left(1 - \left| \frac{x - x_i}{d(x)} \right|^3 \right)^3 \quad (10)$$

siendo x = valor predictor asociado con el valor y que debe ser suavizado, x_i = mediciones cercanas a x , $d(x)$ = la distancia a lo largo de la abscisa desde x hasta el valor predictor más distante. A continuación se analizan los resultados obtenidos.

Se procede a filtrar la serie de caudales, excluyendo la estimación del caudal efectuada en Torre 18 por las razones ya expuestas. Al comparar los resultados (véase figura 3), los autores identifican la ausencia de gradientes adversos en las pérdidas por filtración, siendo en su totalidad 69.55 l/s y generando una eficiencia por conducción de 94.1 %, representativa de toda la longitud

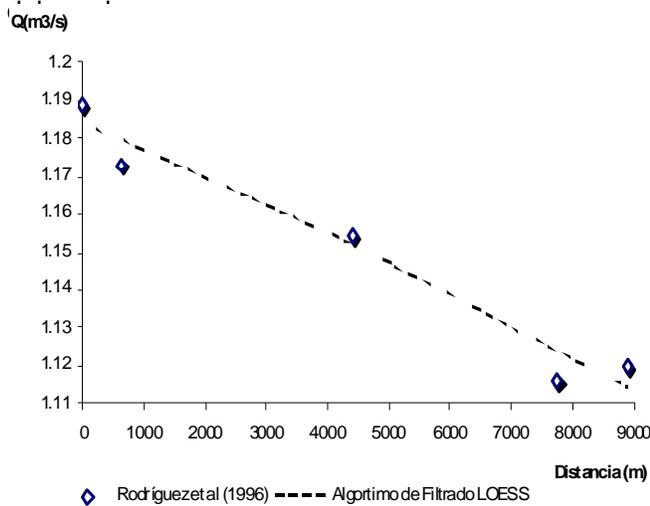


Figura 3 Variación del caudal de circulación a lo largo del canal de Albear

En la figura 4 se muestra un cambio de tendencia después del proceso de filtrado. En efecto, las observaciones tienen un comportamiento sinuoso y a juicio del autor no está en correspondencia con el caudal que ingresa en la torre Norte del canal de Albear, el cual ya se ha mencionado que tuvo muy poca variabilidad. El comportamiento del caudal que resulta del análisis y filtrado de las mediciones arroja una tendencia ligeramente creciente pero estable en todo el intervalo de tiempo. Este resultado sustenta la robustez del algoritmo LOESS en una medición con uniformidad temporal y está en correspondencia con el comportamiento del flujo en dicha conduc-

ción. Los parámetros estadísticos de esta serie temporal filtrada ahora muestran resultados más representativos: el caudal promedio $m = 0.967 \text{ m}^3/\text{s}$, la varianza $s^2 = 0.001$ y el coeficiente de variación con respecto a la media $CV = 0.027$

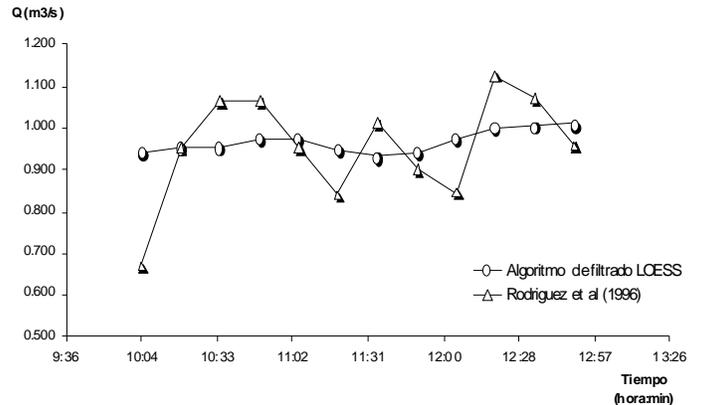


Figura 4 Comparación de los caudales de entrega al depósito Oeste

Con estos resultados pueden estimarse que las pérdidas por filtración en el canal totalizan 222.18 l/s, con una eficiencia por conducción de 81.31 %, representativa de toda la longitud. Al mismo tiempo, se detecta una dispersión notable entre los métodos empleados¹⁸, resultando oportuna la introducción de la modelación numérica en el canal de Albear, la cual no ha encontrado espacio en investigaciones precedentes como herramienta para el estudio riguroso del comportamiento hidráulico de dicha conducción, incluyendo la estimación del coeficiente de rugosidad y de las pérdidas de agua a lo largo del canal a partir de las propiedades geométricas de la sección del canal.

Identificación de parámetros

En el presente estudio de caso, la investigación de referencia no reporta mediciones del tirante variando en el tiempo en los puntos interiores canal señalados, resultando oportuna la introducción de una estrategia de calibración en régimen permanente, con la incorporación de la estimación de las pérdidas por filtración \hat{q} , el coeficiente de rugosidad n y el exponente m la ley de resistencia como parámetros e iniciar las discusiones pertinentes al respecto.

Estimación de la resistencia al flujo a partir de un régimen permanente y espacialmente variado

El perfil de flujo será representado por la ecuación diferencial ordinaria que gobierna el régimen permanente según la ecuación (5), la cual toma en cuenta la presencia de un aporte o descarga lateral por unidad de longitud. Las cotas del lecho de fondo de la conducción, han sido identificadas a partir de los datos del relieve topográfico del canal, cuya pendiente promedio es $S_0 = 0.0002$.

En el proceso de estimación de parámetros relacionados con la actual estrategia de calibración, los autores

realizaron un análisis basado en tres variantes o alternativas en las que son identificados los parámetros anteriormente mencionados. Un detalle importante, es el hecho de que la única sección de aforo del canal se encuentra ubicada en la Torre Norte y en dicha sección se ha estimado que el coeficiente de rugosidad⁴ $n = 0.013$. Es evidente que adoptar dicho valor para todo el canal no es lo suficientemente representativo de las condiciones reales de flujo, si se toma en cuenta que posterior a la fecha de la investigación¹⁸, el canal en su interior estuvo sujeto a una rehabilitación entre los años 2000 y 2003. Las variantes estudiadas se definen como:

- a) **Variante 1:** Coeficiente de rugosidad variable y las pérdidas por filtración son estimadas a partir del método de adición de masa¹⁸.
- b) **Variante 2:** Coeficiente de rugosidad variable y las pérdidas por filtración son estimadas a partir del aforo volumétrico en el depósito Oeste de Palatino¹⁸.
- c) **Variante 3:** Coeficiente de rugosidad y pérdidas por filtración variables en toda la longitud del canal.

En el Apéndice II se exponen los resultados de la estimación de parámetros efectuadas en cada una de las variantes anteriormente definidas. El coeficiente de rugosidad n mostró un comportamiento oscilante a lo largo del canal, sin embargo suficientemente estable como para adoptar un valor promedio de 0.0139, así como valores mínimo y máximo iguales a 0.01 y 0.017 respectivamente. El parámetro m se mostró muy estable tomando valores entre 0.1499 y 0.1675 como mejores estimadores. Las pérdidas por filtración q se han expresado en l/s/km. En el Apéndice II puede apreciarse cómo el comportamiento de la filtración resulta variable y los máximos valores se registran entre Torre 18 y Torre 19 (431.73 m) A partir de estos resultados, es posible contrastar la variabilidad espacial del caudal de circulación de acuerdo con las variantes planteadas, tal y como se muestra en la figura 5.

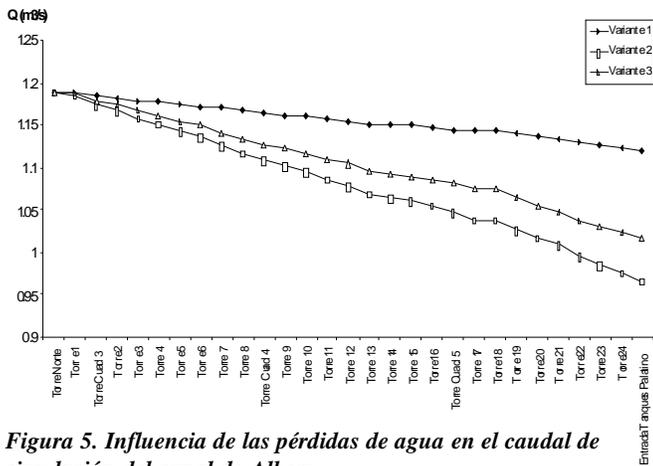


Figura 5. Influencia de las pérdidas de agua en el caudal de circulación del canal de Albear

Las variantes 1, 2 y 3 permiten arribar a eficiencias por conducción de 94.15%, 81.31 % y 85.67% respectiva-

mente, siendo la variante 3 la que minimiza los errores entre las observaciones y las simulaciones efectuadas. Sin embargo, la variante 2 pudiera identificarse como suficientemente representativa del proceso de identificación de parámetros según los resultados obtenidos por los autores.

Comparación con el modelo HEC-RAS

Una comparación de los resultados de la variante 3 con el modelo HEC-RAS v 3.1.3 ha sido realizada por los autores. El procedimiento para el cálculo del nivel de la superficie del agua en una sección transversal, el modelo HEC-RAS lo realiza a través de un proceso iterativo, a través de la solución de la ecuación de energía. En este proceso, existe un número máximo de iteraciones que permite obtener un perfil de la superficie del agua con el menor error posible¹⁰. El método empleado por los autores con quinto orden de precisión, acoplado al correspondiente algoritmo de calibración constituye una herramienta robusta desde el punto de vista numérico y permite abordar situaciones complejas.

Considerando régimen subcrítico en dicho modelo, para estimar la resistencia al flujo se utilizó el criterio de la pendiente media de fricción ya que asegura resultados confiables y estables desde el punto de vista numérico. Se introdujo además la misma variación espacial del coeficiente de rugosidad y del caudal de circulación que fue obtenida por los autores en la variante 3. Como condiciones de frontera se introdujeron niveles correspondientes a tirantes conocidos en Torre Norte ($h = 1.10$ m) y en la descarga a los depósitos de Palatino ($h = 0.74$ m).

Tal y como puede apreciarse en la figura 6, se muestra un balance favorable con respecto a la variante 3, simulación que fue efectuada en la presente contribución adoptando una ley de resistencia al flujo característica de la conducción, así como una distribución espacial de la descarga por filtración. Las diferencias fundamentales radican, como era de esperar, en el método numérico para la solución del sistema de ecuaciones (2).

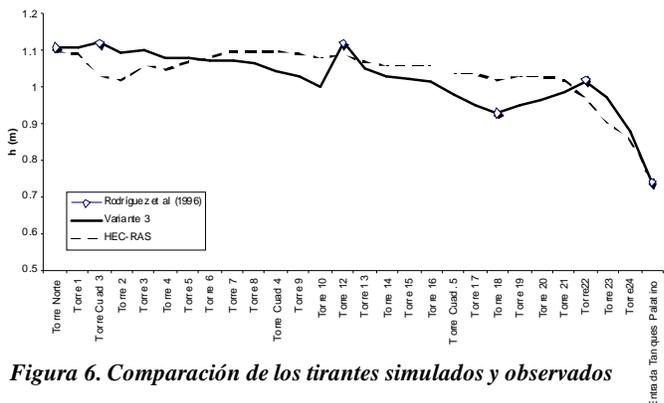


Figura 6. Comparación de los tirantes simulados y observados

CONCLUSIONES

La modelación matemática del canal de Albear ha sido llevada a cabo por los autores para evaluar su comportamiento hidráulico, los cuales no han encontrado aplicaciones precedentes similares en esta obra relevante de la ingeniería cubana.

La ecuación que gobierna el flujo permanente unidimensional y espacialmente variado en conducciones libres fue resuelta por el método de Runge-Kutta, implementado en MATLAB en la herramienta ODE45 y los resultados han sido contrastados con el modelo profesional HEC-RAS para la simulación del comportamiento hidráulico del canal, pudiéndose comprobar que el tipo de esquema es sensible a la estrategia de calibración adoptada. Esto pone en evidencia la robustez y precisión del método de Runge-Kutta frente al procedimiento de cálculo empleado en HEC-RAS.

De manera conjunta, fue implementado un algoritmo de búsqueda local para la identificación de parámetros sujeto a restricciones, acoplado con una ley de resistencia característica de la conducción, capaz de adaptarse a cualquier material que recubra el lecho de fondo, así como a cualquier régimen de flujo, lo cual incrementa la flexibilidad y rango de aplicación del método numérico empleado. La identificación de parámetros fue desarrollada para minimizar la suma de los errores cuadráticos entre simulaciones y comportamiento real del flujo, según observaciones reportadas¹⁸. Tomando en cuenta las posibles fuentes de incertidumbre en las mediciones, fue introducido el proceso de filtrado de las mismas como parte importante de la filosofía de trabajo de la modelación numérica haciendo uso del algoritmo LOESS en los dominios espacio y tiempo.

Sin embargo, es imposible dejar de hacer mención a la real necesidad de materializar mediciones en el canal de Albear, para validar numéricamente los resultados de la calibración efectuada y así estar en condiciones de pronosticar el comportamiento hidrodinámico del mismo, desde la toma en la sección de aforo (torre Norte) hasta la descarga, en la entrada a los depósitos de Palatino.

REFERENCIAS

- [1]. **Aguas de la Habana, (2002)**: Informe Técnico de Visita al Canal. Empresa Aguas de la Habana
- [2]. **Aguas de la Habana (a), (2006)**: Datos históricos de los niveles en Vento. Informe de producción de agua. Departamento de Producción. Empresa Aguas de la Habana.
- [3]. **Aguas de la Habana (b), (2006)**: Informe de Presidentes. Distribución Territorial del Abasto de Agua. Empresa Aguas de la Habana.

- [4]. **Alfonso, J.L (2006)** Comunicación Personal.
- [5]. Carnahan, B.; Luther, H.A.; Wilkes, J.O. (1969): Applied Numerical Methods. John Wiley and Sons.
- [6]. **Chow, V.T; Maidment, D.R; Mays, L.W (1994)**: Hidrología Aplicada. Impreso en Colombia.
- [7]. **Cohen, R. A. (1999)**: An Introduction to PROC LOESS for Local Regression. Paper 273. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- [8]. **Escartín, E (2006)**: Introducción al Análisis Exploratorio de Datos. Departamento de Geociencias. ISPJAE.
- [9]. **García Blanco, R; Pérez Monteagudo, F.; Aruca Alonso, L.J.; Álvarez Hernández, A. (2002)**: Una Obra Maestra: El Acueducto Albear de La Habana. Editorial Científico Técnica. La Habana.
- [10]. **Hydrologic Engineering Center (2002)**: HEC RAS Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. <http://www.hec.usace.army.mil>
- [11]. **Martínez González, Y; Cabrera Estupiñán, E. (2004)**: Consideraciones Sobre la Resistencia al Flujo en Canales. Caso de Estudio: Canal Experimental del CIH. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR. Sao Paulo. Brasil.
- [12]. **Martínez González, Y (2006)**: Análisis del Comportamiento Hidráulico de Canales en Régimen Impermanente Mediante la Modelación Matemática. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería Civil. Centro de Investigaciones Hidráulicas, CIH. ISPJAE. Ciudad de la Habana. Cuba. ISBN: 2409-2007
- [13]. **MATLAB Help Window (1997)**: MATLAB Help Topics. MATLAB version 5.01. The MathWorks, Inc.
- [14]. **Meléndez Robledillo, M; Hernández de Torres, M; Torres Pérez, M; Peña Mellado, R (2006)**: Medición de caudales. Un nuevo procedimiento inspirado en el método de las diluciones comparadas. Comunicación Técnica. Revista Foresta No 31. Asociación y Colegio Oficial de ingenieros Técnicos Forestales. pp 26-33 <http://www.forestales.net>
- [15]. Mesa, H. R. (2000), Solución del Problema Inverso en Modelos de Flujo del Agua Subterránea Mediante un Algoritmo de Convergencia Global. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. ISPJAE. CIH. Ciudad de La Habana. Cuba.
- [16]. **Mesa, H. R. (2002)** Calibración Automatizada de Parámetros Hidrogeológicos para Acuíferos en Régimen Impermanente. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR. Ciudad de La Habana. Cuba.
- [17]. **Pacho Pardo, F (1954)**: El canal de Albear: ¿tubería o conducto libre? Revista Ingeniería Civil. Vol. V, No 6. Junio, La Habana, Cuba.
- [18]. **Rodríguez, T.; Alfonso Mon, E.; Alfonso, J.L. (1996)** Estudio sobre los Ciclos del Agua en La Habana. Evaluación hidráulica del Canal de Albear. Determinación de las Pérdidas.
- [19]. **Strelkoff, T (1970)**: Numerical Solutions of the Saint Venant equations. J. Hydr. Div., ASCE, Vol 96, No 1.

APÉNDICES

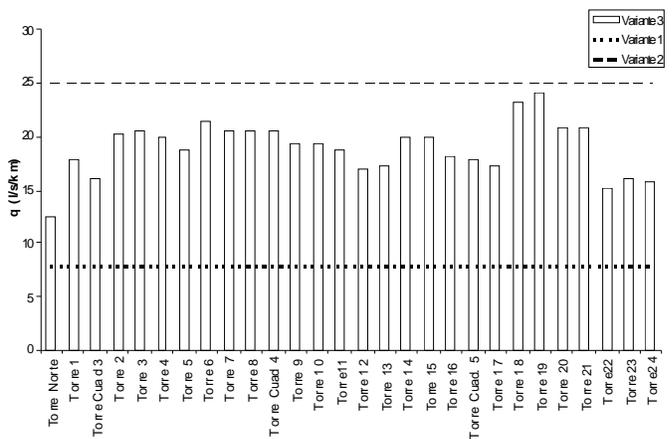
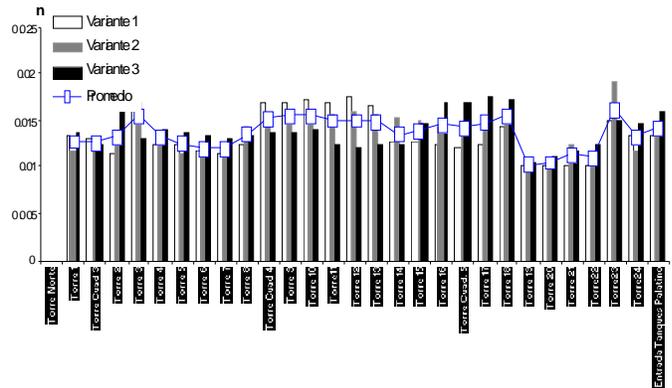
Apéndice I

Problemas presentados en el interior del canal de Albear



Apéndice II

Resultados de la calibración en régimen permanente para cada una de las variantes analizadas



Octubre de 2008