

## Sobre el posible origen y calibración de la curva de descarga del canal de Vento

Dr. Yoel Martínez González

email: [ymg@instec.cu](mailto:ymg@instec.cu)

Facultad de Medio Ambiente, FaMA

Instituto de Tecnología y Ciencias Aplicadas, InSTEC

Universidad de La Habana, UH

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis sobre el posible origen y calibración de la curva de descarga de la sección de aforo ubicada en la Torre Norte del canal de Vento. Se presta especial atención al cálculo de conductos cerrados al estudiar una serie de expresiones empleadas por Albear en su proyecto original. De igual forma, empleando mediciones realizadas en investigaciones previas, así como registros de valores medios mensuales de las profundidades de circulación entre los años 1952 y 2006, ha sido posible analizar la variación de la rugosidad en el tiempo y la consiguiente variación en la capacidad de conducción del canal de Vento, tras 125 años de operación.

**Palabras clave:** Albear, canal de Vento, curva de descarga.

## On the possible origin and calibration of the Vento channel rating curve

### ABSTRACT

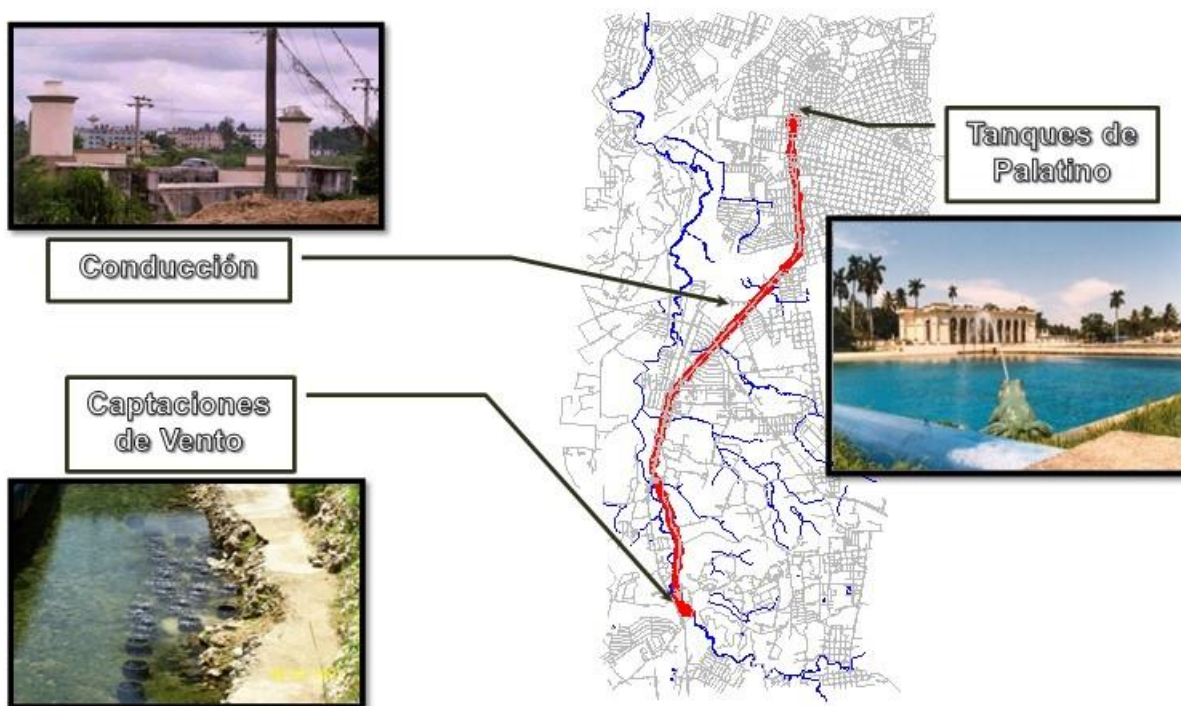
In the present contribution an analysis is made about the possible origin and calibration of the discharge curve of the gauging section located in Torre Norte in the Vento channel. Special attention is paid to the calculation of closed conduits when studying several expressions used by Albear in his original project. Similarly, using measurements made in previous researches, as well as records of average monthly values of the depth circulation between 1952 and 2006, it has been possible to analyze the variation of the roughness with time and the consequent variation in the capacity discharge of the channel after 125 years of operation.

**Keywords:** Albear, Vento channel, rating curve.

## INTRODUCCIÓN

El acueducto de Albear es el más antiguo de los acueductos de la ciudad de La Habana y actualmente es gestionado por la empresa Aguas de La Habana. La fuente de abasto de dicho acueducto, ubicada en la cuenca Almendares-Vento consta de dos captaciones por gravedad denominadas Taza Grande y Taza Chica, así como de un pozo profundo habilitado con un equipo de bombeo, el cual actualmente no está en explotación, solo es usado en época de sequía.

La Taza Grande es la obra principal y más antigua del acueducto la cual capta un número de manantiales los cuales se encuentran aislados del río Almendares, mediante un muro de hormigón armado y entrega sus aguas junto con las de Taza Chica a través de un canal que cruza el río 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 superior a los 60 000 m<sup>3</sup>, tal y como se aprecia en la figura 1.



**Figura 1. Trazado del canal de Vento desde las captaciones hasta los tanques de Palatino**

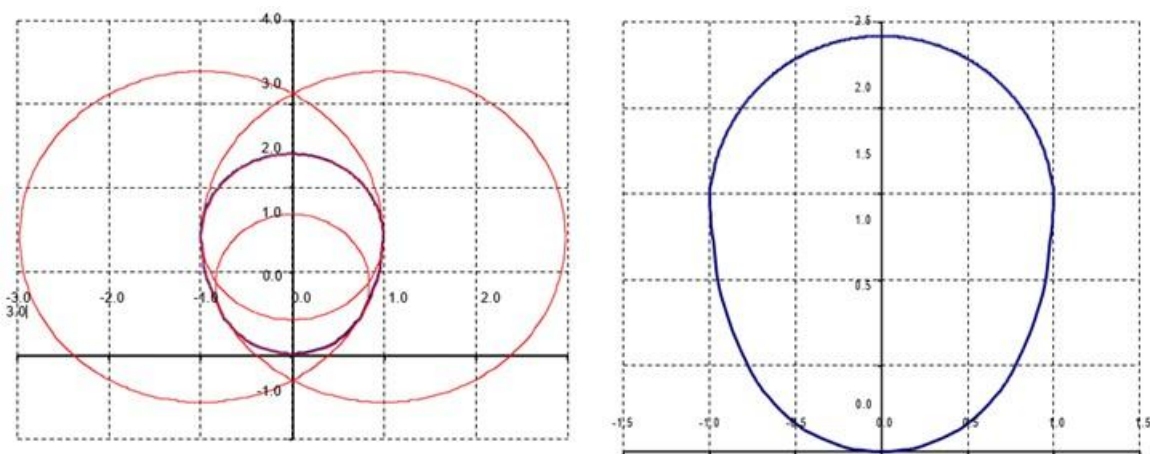
El acueducto de Albear se considera una obra maestra de la hidráulica en Cuba, es Patrimonio Nacional y constituye una de las 7 maravillas de la ingeniería cubana. Se encuentra en explotación a 125 años de su construcción. Junto a otras fuentes de abasto, sus aguas llegan a los 5 municipios del centro de la capital.

Su aporte con respecto al volumen total que tributan todas las captaciones que gestiona Aguas de La Habana representa el 21 % así como el 12,23 % del agua potable que consume la población de La Habana, por lo que influye significativamente en el volumen total de entrega a la ciudad. Su captación a partir de manantiales y su conducción por gravedad, implica la no utilización de equipos de bombeo, asegurando con esto un ahorro energético al país de gran consideración (Aguas de La Habana 2006).

## CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE VENTO

Acorde con Fernández (1950) el propósito de Albear fue originalmente el de construir un canal para aguas libres, o sea un canal abierto a presión atmosférica, adaptando las antiguas secciones de acueductos romanos de caz trapezoidal, con un modelo parecido al acueducto romano de Colonia en Alemania.

El canal de conducción de las aguas captadas en Vento, presenta una geometría no rectangular, revestido y cubierto por una bóveda. Su longitud aproximada es de 9 km (8894,57 metros) entre Vento y los depósitos de almacenamiento en Palatino y una pendiente promedio de 1:5000. La complejidad de su representación es tal que merece algunas líneas dentro de la presente sección. La sección del canal es el resultado de la concurrencia de cuatro circunferencias con diferentes radios y centros, poniéndose así en certeza el ingenio de Albear a través de sus elevados conocimientos de geometría analítica plana (ver figura 2).



**Figura 2. Representación geométrica de la sección transversal del canal de Vento**  
(fuente: Martínez 2006)

La fundamentación del tipo de conducción también está reportada por Pacho Pardo (1954) y García et al. (2002) donde se exponen las razones que llevaron a Albear a seleccionar un conducto de sección ovoide y que fueron las siguientes:

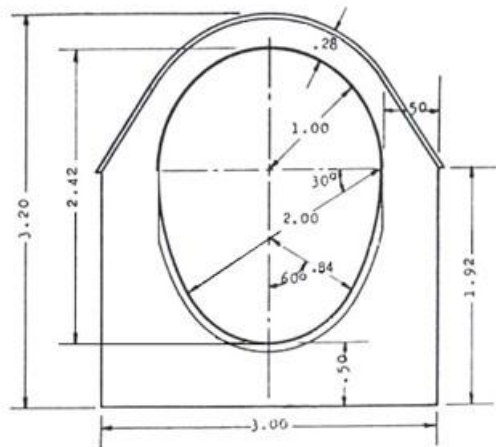
- Las tuberías de hierro fundido a presión tenían mayores costos y pérdidas de carga.
- Un canal revestido y cubierto, bien construido, no requería de reparaciones continuas, como es el caso de las tuberías de hierro fundido.
- Además ofrecía amplias ventajas sanitarias y las características de su trazado implicaba que la mayor parte estuviese en galería, lo que hubiera impedido la inspección del tubo de hierro fundido.

Desde luego que, adoptando la forma ovoide con la punta en la parte inferior del eje máximo del ovoide, considerando el caz principal o canal de construcción, quedara el semicírculo o medio punto, superior en importancia secundaria, o sea solamente, con una cubierta del caz principal interior. Esto presenta también la ventaja constructiva de que los ladrillos para voltear la bóveda de la cubierta, son hechos con un solo molde o tipo, ya establecidos para toda la longitud del canal. La forma geométrica ovoidal a primera vista aparece una innovación para la seguridad de obra, pues eran frecuentes la ocurrencia de crecientes de los arroyos existentes casi a ras del terreno y en algunos casos por sobre el nivel del canal, quedando este cubierto por aguas superficiales en muchos cauces pluviales entre Vento y Palatino.

La forma ovoide, con su vértice más estrecho, presenta hacia abajo un volumen mayor de mampostería en la base de la obra, actuando así como dos muros de contención de gran efectividad para contener las presiones internas de las tierras saturadas de agua hacia dentro del canal (Fernández 1950). El canal está construido de mampostería en la parte destinada a conducir la mayor proporción de su volumen líquido y fue cuidadosamente recubierto con mortero de muy buena calidad. Por esta razón, a pesar de que el canal fue sometido a una rehabilitación capital entre los años 2000 y 2002, ha permanecido hasta la fecha en muy buen estado, poseyendo una superficie uniformemente lisa manteniendo altos niveles de eficiencia por conducción.

### PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

Las propiedades geométricas han sido formuladas analíticamente por Pacho Pardo (1954) 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 3. La complejidad matemática se hará evidente para el lector por la necesidad de dividir dicha sección en tres desarrollos geométricos con características diferentes. En efecto, se establecen las expresiones para el área  $A$  y perímetro mojado  $P$  (ver tabla 1), tomando en cuenta que propiedades como el ancho superficial  $T=dA/dh$ , el radio hidráulico  $R=A/P$  y profundidad hidráulica  $D=A/T$ , es posible determinarlas a partir de tales propiedades.



**Figura 3. Representación geométrica y dimensiones de la sección transversal del canal de Vento** (fuente: Pacho Pardo 1954). Nota: Las dimensiones lineales están en metros

### CURVA DE DESCARGA

Pacho Pardo (1954) analizó cómo el conducto diseñado por Albear para un régimen de circulación libre, durante la época de lluvias, estuvo sometido a un régimen de circulación forzada en más de la mitad de su longitud. Esto fue ocasionado debido al rápido crecimiento de la población de La Habana y al aumento del caudal de las fuentes de abasto, y no disponiendo de otro conducto para traer las aguas a la ciudad, por consiguiente éste fue sobrecargado. Para comprobar las descargas del canal fueron realizados varios aforos. Para ello seleccionó entre las 24 torres del canal, aquella cuyo régimen de circulación siempre fuera libre, resultando

la Torre 19 para llevar a cabo los aforos. Esto le permitió obtener una curva que relacionaba la descarga  $Q$  en función de la profundidad de circulación  $h$  medida en Torre Norte.

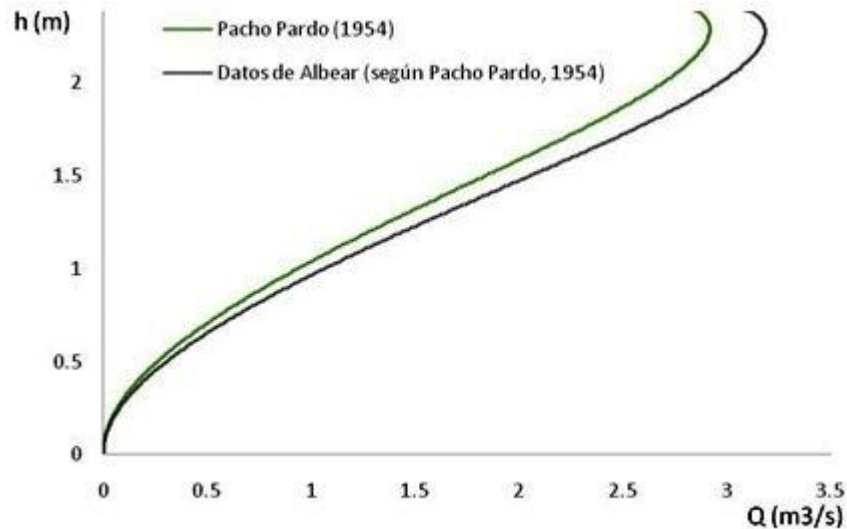
De igual forma, comparó sus resultados con una curva de descarga a partir de datos reportados por Albear, siendo válido destacar que no hizo referencia a la fuente de donde ésta fue extraída para el análisis conducido por él (ver figura 4).

**Tabla 1. Propiedades geométricas de la conducción en función de los radios  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$**

Rango de profundidades	Propiedad geométrica
$0 \leq h \leq 0,42$ m	$A = \frac{R_3^2}{2} (2\beta - \text{sen}2\beta) \quad \beta = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{R_3} \right)$ $P = 2 R_3 \beta$
$0,42 \leq h \leq 1,42$ m	$A^* = \frac{\pi}{3} R_3^2 + \frac{\pi}{6} R_2^2 + (R_2^2 - R_3^2) \frac{\sqrt{3}}{4} - R_1 R_2$ $\alpha = \text{sen}^{-1} \left( \frac{1,42 - h}{R_2} \right)$ $A = A^* - R_2^2 \alpha - R_2 (1,42 - h) \sqrt{1 - \left( \frac{1,42 - h}{R_2} \right)^2} + 2R_1 (1,42 - h)$ $P^* = (R_2 + 2R_3) \frac{\pi}{3} \quad P = P^* - 2R_2 \alpha$
$1,42 \leq h \leq 2,42$ m	$\theta = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{h - 1,42}{R_1} \right)$ $A = A^* + R_1^2 \theta + R_1 (h - 1,42) \sqrt{1 - \left( \frac{h - 1,42}{R_1} \right)^2}$ $P = P^* + 2R_2 \theta$

El autor del presente trabajo no ha encontrado evidencia en ninguna de las fuentes consultadas, de que Albear dedujera alguna relación funcional entre caudal y profundidad de circulación para el conducto. Al no disponer de la “Memoria sobre el proyecto de conducción a La Habana de las aguas de los manantiales de Vento” (en lo adelante Memoria...), entre los documentos consultados más relevantes se encuentran Fernández (1950) y García et al. (2002).

La primera de ellas, coincidentemente es una de las dos referencias citadas por Pacho Pardo (1954) donde no existe alusión a la obtención de la mencionada curva de descarga de Albear y en la segunda, al realizarse la valoración científico-técnica del acueducto, tan sólo se hace mención a sus propiedades geométricas, velocidad media y caudal de circulación, donde resulta relevante que se destaca también la no mención de la fórmula empleada por Albear en el diseño del canal que conduce las aguas de Vento.



**Figura 4. Comparación de curvas de descarga del canal**

Por otra parte, tal y como reportan García et al. (2002), en el proyecto de conducción de los acueductos de La Habana y Madrid existe similitud al utilizar secciones no rectangulares para los conductos, entre otros aspectos de interés.

Los ingenieros Juan Rafo y Juan de Ribera para el cálculo de los caudales de circulación del canal Isabel II, una vez definido su trazado y perfil declararon haber utilizado las ecuaciones de Eytelwein y Prony. Sin embargo, como ya fue mencionado anteriormente, Albear no dio detalles en su Memoria... de la fórmula utilizada y sólo la caracteriza como que se obtiene menos caudal que el real con ésta, lo cual garantizaría un factor de seguridad adecuado. Se indicaba además que la pendiente sería uniforme y que la velocidad media de 0,6 m/s implicaba un caudal de 103 680 m<sup>3</sup>/día, que representan exactamente 1,20 m<sup>3</sup>/s (García et al. 2002).

Como es conocido, en su “Memoria del proyecto de la distribución” (citado por García et al. 2002), Albear realizó un estudio comparativo con un elevado rigor científico utilizando 14 fórmulas de 12 autores diferentes entre las que se encontraban las expresiones de Prony, Eytelwein y Darcy. En este proyecto, Albear se decidió por la de Darcy ya que tenía en cuenta el estado del uso de los conductos. Además, por “la gran confianza que merece su experimentado y laborioso autor y porque siendo la que da menores resultados, no hay riesgo de equivocarse por exceso...”

El autor ha consultado un grupo de fórmulas utilizadas por Albear entre las que se encuentran: Dupuit, 2 ecuaciones de Eytelwein y Weisbach, citados por Pérez Franco (2002), Prony, D’Aubuisson (Gibson 1952), Levy, Somnet (citados por SanJuan 1960) y Darcy, citado por Gibson (1952), SanJuan (1960), Pérez Franco (2001, 2002) y García et al. (2002), las cuales al unificar notaciones se expresan formalmente como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2. Algunas fórmulas para el cálculo de conductos utilizadas por Albear**

Autor	Fórmula	Ecuación
Dupuit	$I = \frac{4}{D} 0,0003855 V^2$	(1)
Eytelwein	$I = \frac{2}{D} 0,000795 V^2$	(2.a)
	$I = \frac{2}{D} 0,0006515 V^{\frac{35}{18}}$	(2.b)
Weisbach	$I = \frac{4}{D} \left( 0,0007336 + \frac{0,0004828}{\sqrt{V}} \right) V^2$	(3)
Prony	$I = \frac{2}{D} (0,000034665 V + 0,00069652 V^2)$	(4)
D'Aubuisson	$I = \frac{1}{D} (0,000061672 V + 0,00034149 V^2)$	(5)
Levy	$I = \frac{4}{K^2 D \left( 1 + \frac{3}{2} \sqrt{D} \right)} V^2$ $K = \sqrt{\frac{4g}{k'}} \quad \text{donde } k' = 0,09301$	(6)
Somnet	$I = \frac{\alpha}{2gD} V^2$ $\alpha = 0,0171 + \frac{0,0024\sqrt{D} + 0,0006}{D}$	(7)
Darcy	$I = \frac{4}{D} 0,000519 V^2$	(8)

Nota:  $I$  = gradiente (inclinación por metro, m/m);  $D$  = diámetro (m);  $V$  = velocidad (m/s)

Al sustituir el diámetro  $D = 4R$ , el autor ha podido comprobar que, para una profundidad de circulación igual a 1,42 m, justo donde termina la sección abierta y comienza el caz de cubierta, se alcanzan los siguientes resultados para cada una de las fórmulas consultadas, tal y como se representan en la tabla 3.

Los resultados obtenidos en la tabla 3 indican que la fórmula de Darcy permite verificar el valor de caudal reportado por Albear, citado por García et al. (2002), lo cual parece ser algo más que una simple coincidencia de carácter numérico pues el propio Albear reconoció la confianza que ofrecía la ecuación de Darcy. Este razonamiento se encuentra estrechamente vinculado con las modificaciones que el propio Albear fue realizando según las necesidades adicionales de agua en la capital.

Alrededor de 1855, la población de La Habana era de unos 150 000 habitantes (García et al. 2002). El pronóstico de población para el cálculo de las necesidades de agua fue de 300 000 habitantes, cifra que estaba en correspondencia con un total correspondiente de 102 000 m<sup>3</sup>/día acorde con las normas de la época. De los más de 100 000 m<sup>3</sup>/día inicialmente

obtenidos en su estudio, estas necesidades adicionales incrementaron la cantidad de agua captada hasta 150 000 m<sup>3</sup>/día (1,736 m<sup>3</sup>/s), pudiendo llegar incluso hasta 175 000 m<sup>3</sup>/día (2,025 m<sup>3</sup>/s) siendo notorio que el propio Albear no justificara este incremento en sus documentos (García et al. 2002).

**Tabla 3. Estimaciones del caudal conducido por el canal de Vento**

Autor	Caudal	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /día
<b>Dupuit</b>	1,394	120403,08
<b>Eytelwein</b>	1,372	118571,75
	1,353	116894,10
<b>Weisbach</b>	1,016	87861,02
<b>Prony</b>	1,411	121911,61
<b>D'Aubuisson</b>	2,452	211890,26
<b>Levy</b>	1,391	120195,14
<b>Somnet</b>	1,762	152242,51
<b>Darcy</b>	1,201	103768,64

La curva según datos de Albear (reportada por Pacho Pardo 1954) arroja una descarga de 170328,96 m<sup>3</sup>/día (1,971 m<sup>3</sup>/s), valor muy cercano a este mencionado incremento en la captación como consecuencia de las estimaciones de Albear en cuanto al crecimiento de la población y referido además a la profundidad de 1,42 m, lo cual a juicio del autor de la presente contribución, le otorga confiabilidad independientemente de la manera que dicha curva fue obtenida.

Por su parte, la obtenida por Pacho Pardo (1954) a partir de mediciones, establece como descarga 141937,87 m<sup>3</sup>/día (1,6428 m<sup>3</sup>/s) para igual profundidad de circulación, valor que también se encuentra en correspondencia con el límite inferior de las cantidades adicionales de agua captadas estudiadas por Albear.

De este análisis puede establecerse una interpretación cuyo sustento no es casual: las curvas representadas en la figura 4, pueden establecer los rangos en que pudiera desplazarse la variación de la descarga atendiendo a las estimaciones realizadas por Albear relativas a la necesidad de agua en La Habana, en función claro está, de sus pronósticos.

Las mediciones reportadas por Pacho Pardo (1954) corroboran que dicho conducto fue diseñado para ser capaz de conducir 150 000 m<sup>3</sup>/día, cifra que, acorde con García et al. (2002), Albear estableció en 1865 al ser objeto de su análisis y aprobación, manteniéndose fija en el resto de los documentos. Esta conclusión no contradice el hecho de que la fórmula de Darcy haya sido utilizada en el dimensionamiento del conducto de sección ovoidea seleccionado. Debe tenerse en cuenta que el propio Albear reconoce que el caudal real era algo mayor que el obtenido, pues tal y como llegó a expresar en sus documentos: "...no hay riesgo de equivocarse por exceso..."



## ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL CANAL DE VENTO EN LA SECCIÓN DE AFORO

Una de las principales insuficiencias en la correcta cuantificación de las descargas en conductos con secciones de aforo establecidas, es la no existencia de estimaciones de parámetros, suficientemente seguras, para un amplio rango de variación de profundidades de circulación de flujo. Por esta razón, para conducir este análisis el autor ha recopilado una serie de observaciones simultáneas de profundidad y caudales de circulación en el canal, realizadas por diferentes autores en diferentes períodos, (véase tabla 4 y figura 5).

**Tabla 4. Mediciones de profundidad y caudal en la Torre Norte del canal de Vento**

Autor	Fecha	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$h$ (m)
Albear (*)	Anterior a 1893	1,98	1,42
Francis y Hyde	05/06/1908	1,88	1,38
Moutouliou	29/06/1912	2,36	1,56
Pacho Pardo	5/1-2/1953	2,64	1,96
	1953	1,66	1,42
Rodríguez et al	27/03/1996	1,19	1,11
Alfonso Ordás	10/02/2004	1,72	1,24
	18/04/2005	0,57	0,69
	04/06/2005	0,52	0,66
	10/06/2005	0,56	0,70
	14/06/2005	0,69	0,79
	04/07/2005	0,92	0,91
	21/07/2005	1,56	1,24
	31/08/2005 (**)	1,62	1,50
(*) Reportada por Pacho Pardo (1954)			
(**) Esta medición no fue incluida en el análisis por la alta dispersión que presenta en relación con las reportadas por el propio Alfonso (2008), en el periodo de referencia 18/04 -31/08/2005			

Es válido destacar que la manera de medir niveles y caudales ha dependido de la época y tecnología a disposición de quienes han llevado a cabo sus experiencias, pero lamentablemente con mucha frecuencia esa información se pierde con el decursar del tiempo. No obstante, el autor de esta contribución ha podido recopilar alguna información al respecto que se aparece resumida en la tabla 5.

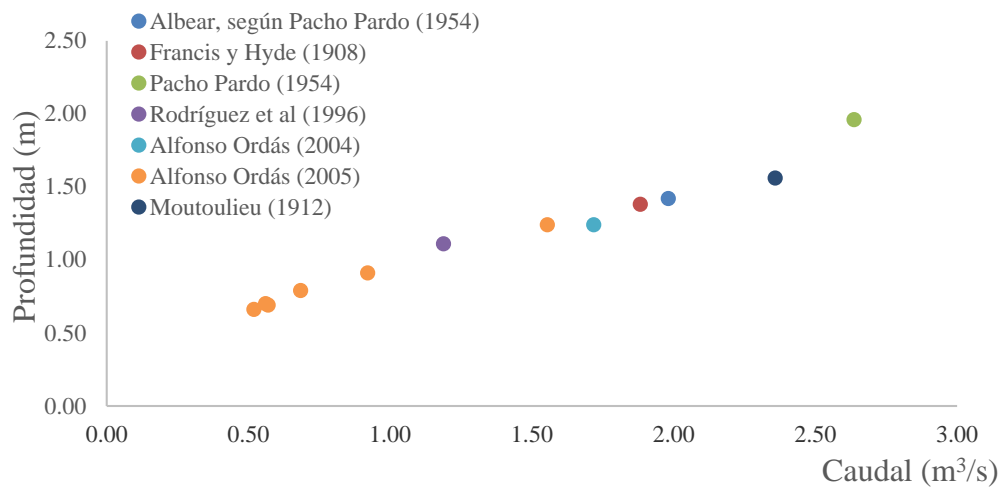
Bajo la hipótesis de una distribución logarítmica de velocidades y con el objetivo de determinar la velocidad media de circulación en el canal, el autor emplea la formulación de Martínez y Cabrera (2006). Dicha propuesta encuentra sustento para esta aplicación por el amplio rango de variación de profundidades de circulación de flujo de la conducción ocurridos entre 1954 y 2008 en el canal. En efecto, considerando la conocida relación:

$$\frac{u_*}{V} = \sqrt{\frac{f}{8}} = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} \tag{9}$$

siendo  $u_* = \sqrt{g R S_o}$ , velocidad de corte (m/s);  $g$  = aceleración de la gravedad, con un valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $R$  = radio hidráulico (m);  $S_o$  = pendiente de fondo del canal ( $1/5000$ );  $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning y  $f$  = factor de fricción, el cual acorde con Martínez y Cabrera (2006) puede expresarse formalmente en la ecuación (10).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,1276 \left[ 1 - 0,9985 \ln \frac{k_s}{R} \right] \tag{10}$$

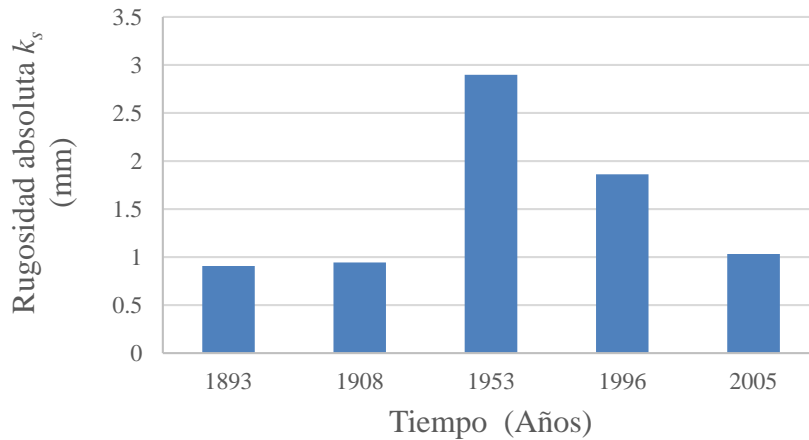
donde  $k_s$  = rugosidad absoluta (m). Al combinar las ecuaciones (9) y (10) es posible despejar la rugosidad absoluta y de esta manera, analizar su variación temporal, tal y como se ilustra en la figura 6.



**Figura 5. Observaciones simultáneas de nivel y caudal en la sección de aforo del canal de Vento para diferentes condiciones de circulación**

**Tabla 5. Características de las mediciones registradas en sección de aforo Torre Norte**

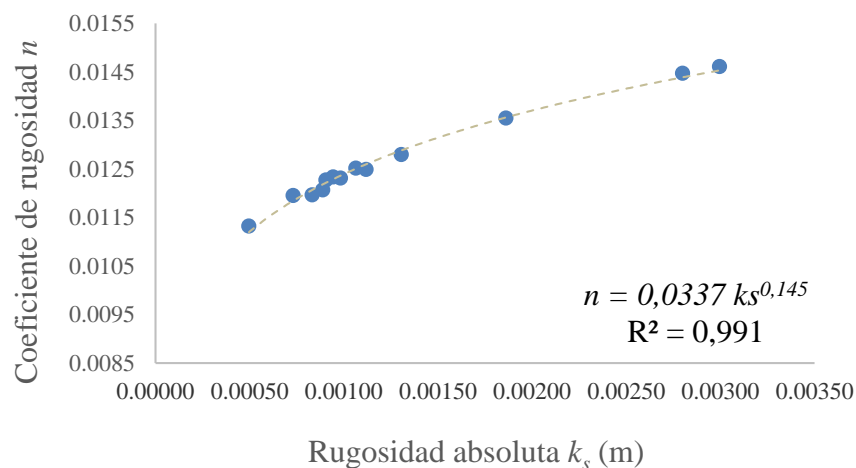
Autor	Variables hidráulicas	
	Profundidad	Caudal
Pacho Pardo (1954)	Regla graduada	Empleó un velocímetro (tipo Gurley), donde midió velocidades a 0,2 y 0,8 de la profundidad de circulación, obteniéndose el caudal con la ecuación de continuidad
Rodríguez et al. (1996)	Galvanómetro	Caudalímetro ultrasónico para medir la descarga que se produce desde Taza Grande a través de los sifones que descargan en el canal de Vento
Alfonso (2008)	Sensor ultrasónico de nivel	



**Figura 6. Variación de la rugosidad absoluta entre 1893 y 2005 en la sección de aforo del canal de Vento**

Acorde con los resultados obtenidos, hasta 1908 el canal de Vento mantuvo condiciones de operación muy similares a las del inicio de su completa operación, es decir, en 1893. Entre 1908 y 1953 ocurre un incremento de la rugosidad absoluta, por condiciones de circulación no reportadas en la literatura consultada, aunque para 1953 el canal contaba ya con 60 años de servicio. A criterio del autor, la disminución de la rugosidad absoluta entre 1954 y 2008 pone en evidencia el efecto combinado del envejecimiento del canal, así como las mejoras en conducción de agua que se produjeron con la rehabilitación del canal durante los años 2001 y 2002. El material de recubrimiento, de mampostería compuesto por cal y arena de sílice ha sufrido el allanado o suavizado de la altura de la rugosidad, lo que trae como consecuencia una disminución de la resistencia al flujo.

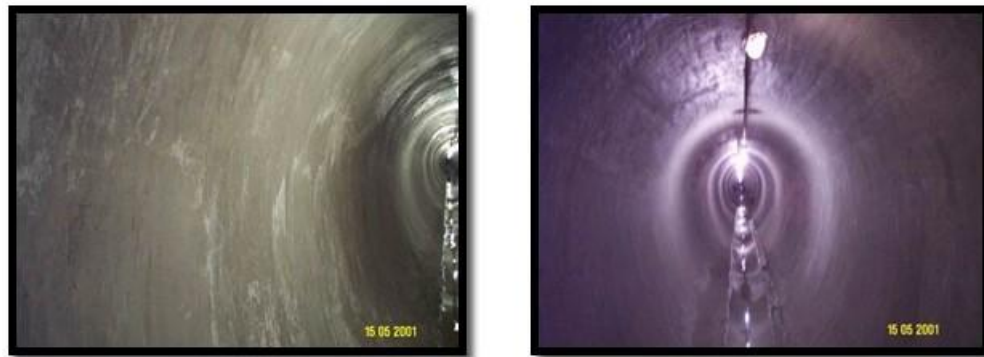
Esta disminución es posible cuantificarla también a partir de la obtención del coeficiente de rugosidad  $n$ , estableciendo su correlación con la rugosidad absoluta  $k_s$ . En la figura 7 se pone de manifiesto una relación del tipo  $n = \alpha k_s^\beta$ , la cual explica la proporcionalidad existente entre la rugosidad absoluta y el coeficiente de rugosidad (Martínez y Cabrera 2006).



**Figura 7. Variación del coeficiente de rugosidad con la rugosidad absoluta**

La correcta determinación del coeficiente de rugosidad y su variación en el tiempo a partir de la variación de la rugosidad absoluta, como se verá más adelante, permitirá obtener estimaciones más precisas del caudal en la sección de aforo, única de su tipo en toda la longitud de la conducción.

Este es un aspecto relevante ya que, a pesar de que el canal se mantenía estable desde el punto de vista estructural en toda su longitud, este sufrió el paso de los años, presentando zonas con desprendimientos del recubrimiento interior, penetración de raíces, acumulación de escombros en su interior, entre otros problemas. Y ante esta situación, se acometió la realización del proyecto de rehabilitación antes mencionado. En la figura 8 se muestran algunas imágenes del interior del canal durante su rehabilitación.



**Figura 8. Imágenes del interior del canal durante su rehabilitación entre los años 2001-2002 (fuente: Alfonso 2008)**

### **ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LA DESCARGA EN LA SECCIÓN DE AFORO DEL CANAL DE VENTO**

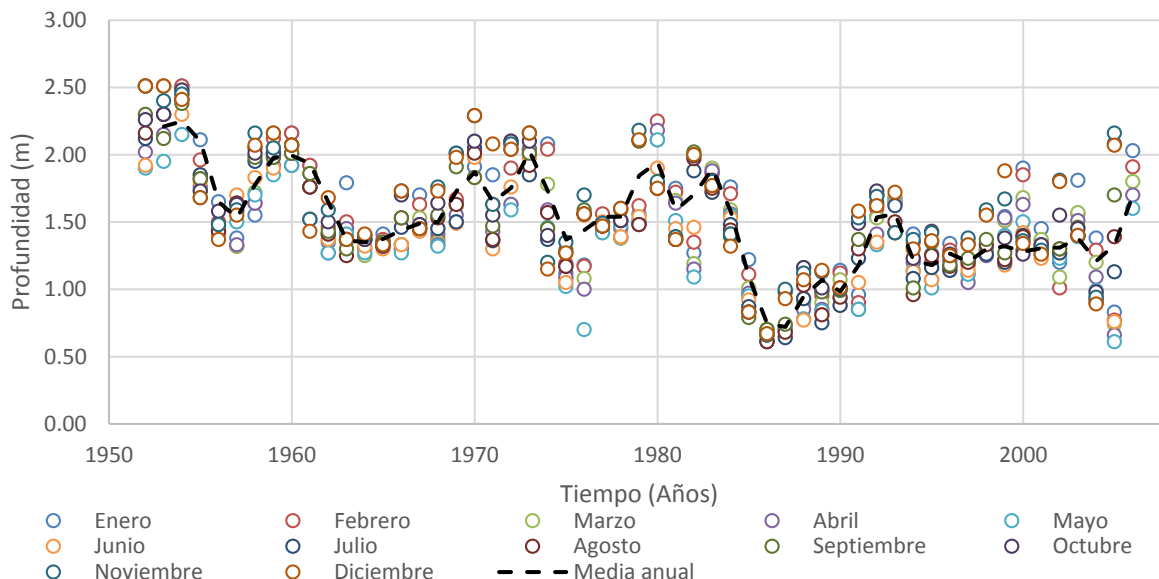
Las variaciones en la descarga del canal pueden ser explicadas a partir de la variación de la resistencia al flujo en la sección de aforo a lo largo del periodo comprendido entre 1893 y 2005.

Para conducir este análisis, el autor también ha utilizado valores de niveles medios mensuales, comprendidos entre los meses de enero a diciembre desde el año 1952 hasta el año 2006 (véase figura 9).

Debido a factores tales como la sobreexplotación de los recursos hídricos de la cuenca Almendares-Vento en años anteriores, los niveles dinámicos de las aguas subterráneas han ido descendiendo, sobre todo en los períodos de sequía.

Esto incide directamente sobre los volúmenes de agua que entregan los manantiales de Vento, llegando en ocasiones a secarse totalmente la Taza Chica.

Este fenómeno ha llegado en ocasiones a reducir la entrega de agua del canal de Vento a los tanques de Palatino a un 50 %, trayendo como consecuencia grandes afectaciones en el servicio. (Aguas de La Habana 2006).



**Figura 9. Niveles históricos registrados en la sección de aforo de Torre Norte entre 1952 y 2006** (fuente: Aguas de La Habana 2006)

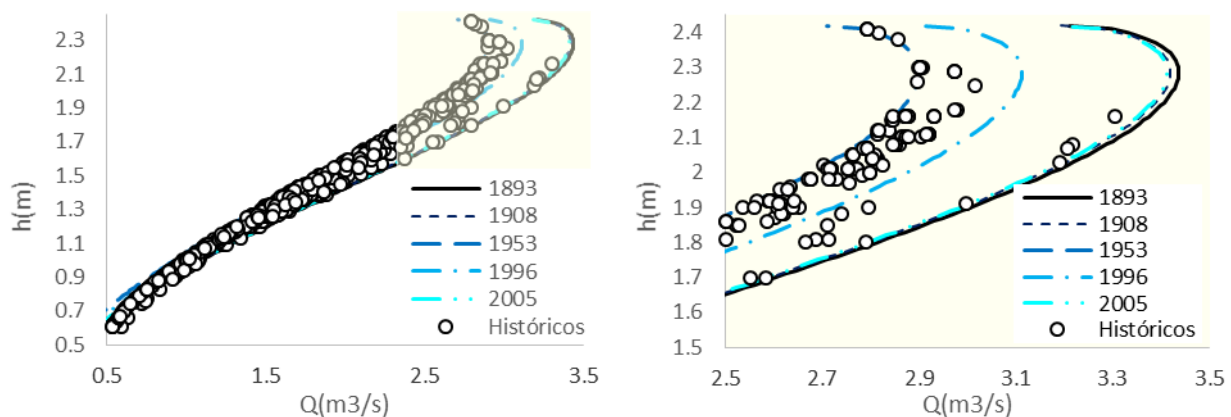
No es objetivo del presente trabajo llevar a cabo una evaluación exhaustiva sobre los factores antes mencionados. Sin embargo, sí es de interés emplear esta base de datos para validar los resultados obtenidos sobre la base de una correcta estimación del coeficiente de rugosidad, considerando su evolución en el tiempo, con el objetivo de obtener estimaciones más precisas del caudal en la sección de aforo del canal de Vento, ubicada en la Torre Norte.

En efecto, a partir de la ecuación (9) y en función de la relación  $n = n(k_s)$ , según figura 7, han sido obtenidas las estimaciones correspondientes de los caudales medios mensuales dentro del periodo 1952-2006, aplicando la ecuación de Manning, monómica como la de Darcy, resultando finalmente:

$$Q(k_s, h) = \frac{0,4196 A(h) R(h)^{2/3}}{k_s^{0,145}} \quad (11)$$

Tal y como puede apreciarse en la figura 10, el grado de dispersión existente en los datos históricos desde 1952 hasta 2006 refleja un desplazamiento de la curva de descarga representativa de la sección de aforo en Torre Norte.

Este desplazamiento fue detectado por Alfonso (2008) al realizar sus mediciones, el cual fue atribuido por dicho autor únicamente a la entonces reciente rehabilitación del canal. Sin embargo, el propio comportamiento de la curva de descarga, sustentada sobre la base de las mediciones reportadas por Pacho Pardo (1954), Rodríguez et al. (1996) y el propio Alfonso (2008), otorga evidencias de que el conducto, antes de su rehabilitación en el año 2002, mostraba una tendencia a la disminución de la altura de la rugosidad (véase figura 7).



**Figura 10. Curva de descarga y su variación en el tiempo**

Por lo tanto, los resultados sugieren que la rugosidad superficial del material de recubrimiento en la sección de aforo, con el paso del tiempo, ha modificado su forma y orientación, lo cual se ha traducido en una disminución de la resistencia al flujo que provoca un incremento en la capacidad de conducción. Por esta razón, el canal de Vento está en condiciones de conducir aproximadamente unos 170 300 m<sup>3</sup>/día y como máximo 291 400 m<sup>3</sup>/día, atendiendo a sus características geométricas y estado del mencionado material que recubre su lecho perimetral.

## CONCLUSIONES

- El acercamiento a la evolución histórica para el cálculo hidráulico de conductos, ha posibilitado al autor expresar algunas ideas sobre el posible empleo de la fórmula de Darcy para el diseño del canal de Albear. Esta hipótesis se ha sustentado de forma paralela con los estudios realizados por Albear sobre las necesidades adicionales de agua a la capital.
- La importancia de esta contribución radica en que los cálculos apuntan a que todo parece indicar que Albear resaltó en su proyecto la importancia de la fórmula de Darcy que se extendió inclusive hasta su proyecto de distribución donde existe evidencia del empleo de 14 ecuaciones, incluida la de este notorio investigador.
- A partir de la recopilación de mediciones realizadas en la sección de aforo del canal, ubicada en Torre Norte, fue posible analizar la variación de la rugosidad en el tiempo y el desplazamiento de la curva de descarga con el correspondiente incremento de la capacidad de conducción. En este sentido ha quedado demostrado que antes de la rehabilitación, la rugosidad del conducto mantuvo una tendencia al alisamiento, no precisamente atribuido al único efecto de la rehabilitación a que fue sometido el conducto.
- La correcta estimación de parámetros de difícil cuantificación, en este caso del coeficiente de rugosidad y por tanto de la rugosidad absoluta, permitió al autor una estimación más realista del caudal de circulación en la sección de aforo del canal de Vento, ubicada en Torre Norte.

## RECONOCIMIENTO

El autor desea reconocer y agradecer a la Empresa Aguas de La Habana por los datos aportados para conducir la presente contribución, así como al Ing. Francisco Pacho Pardo por sus valiosas y desinteresadas observaciones y recomendaciones.

## REFERENCIAS

- Aguas de la Habana** (2006). “Datos históricos de los niveles en Vento”. Informe de producción de agua. Departamento de Producción. Empresa Aguas de la Habana. La Habana. Cuba.
- Alfonso J. L.** (2008). “Valoración hidráulica de la rehabilitación del canal de Albear”. XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. ISBN: 9974800021, Santiago de Chile. Chile.
- Fernández A.** (1950). “Memoria Histórico-Técnica de los Acueductos de La Habana”. Primera Parte. pp 157. La Habana. Cuba.
- García R; Pérez F.; Aruca L. J. y Álvarez A.** (2002). “Una obra maestra: el acueducto Albear de La Habana”. Editorial Científico Técnica. ISBN: 959-05-0286-5, La Habana. Cuba.
- Gibson A. H.** (1952). “Hydraulics and it’s Applications”. Constable & Company LTD. London.
- Martínez Y. and Cabrera E.** (2006). “Considerations on fluid resistance in open channels. case study: CIH experimental channel”. Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 4, October-December, 2006, pp. 87-101. ISSN: 0186-4076. México.
- Martínez Y.** (2006). “Análisis del comportamiento hidráulico de canales en régimen impermanente mediante la modelación matemática”. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Facultad de Ingeniería Civil. Cujae. ISBN: 2409-2007. La Habana. Cuba.
- Pacho Pardo F.** (1954). “El canal de Albear: ¿tubería o conducto libre?”. Revista Ingeniería Civil. Vol. V, No 6. Junio, Colegio de Ingenieros Civiles, La Habana. Cuba.
- Pérez Franco D.** (2001). “Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Primera Parte: Desde los experimentos de Couplet hasta los de Darcy”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol XXII, No. 2. ISSN 1680-0338, Cujae. La Habana.
- Pérez Franco D.** (2002). “Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Segunda Parte: Desde los trabajos de Darcy hasta los de Stanton”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol XXII, No. 3. ISSN 1680-0338, Cujae. La Habana.
- Rodríguez T.; Alfonso E. y Alfonso J. L.** (1996). “Estudio sobre los ciclos del agua en La Habana”. Informe de la situación actual del abastecimiento de agua y el saneamiento. Grupo de Proyectos para el Estudio sobre los Ciclos del Agua en La Habana Metrópolis-Unión Europea. La Habana. Cuba.
- SanJuán R. I** (1960). “Elementos de hidráulica general y aplicada con motores hidráulicos”. Editorial Labor, S.A. Barcelona. Madrid. España.