

Capítulo 3.2

Tecnología sostenible para la experimentación hidráulica: Integración de energías renovables en equipos de laboratorio

Márquez Soto Abel¹

Cabrera Chavarría José de Jesús²

Carrasco García Julieta³

Cabrera Chavarría Lourdes Graciela⁴

<https://doi.org/10.61728/AE20259471>



¹ Estudiante del Doctorado en Agua y Energía. e-mail: abel.marquez8282@alumnos.udg.mx

² Profesor investigador del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: jose.cchavarria@academicos.udg.mx

³ Profesora investigadora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: julieta.cgarcia@academicos.udg.mx

⁴ Especialista en temas hídrico-energéticos. Doctora en Agua y Energía. e-mail: luliscabrera@gmail.com

1. Introducción

El transporte del agua ha sido materia de estudio desde el principio de la humanidad, el hombre ha construido canales para llevarla de un lugar a otro (Mumford, 1961; Jacobsen, 1976), estos poseen características que deben ser estudiadas para entender la dinámica del fluido que transportan, tales como longitud, altura, superficie libre, bordes, pendiente, y otras más que deben ser consideradas para la construcción de los mismos (Chow 1994).

El estudio de los fenómenos que intervienen en el transporte del agua ha motivado a los investigadores a desarrollar diversos estudios, como ejemplos, la optimización del flujo por Swamee y Chahar (2012) y Gleick (2003), así como Bougamouza et al. (2015), Marín et al. (2012), que realizaron análisis a nivel laboratorio del flujo, geometría, fenómenos físicos y pendiente del canal. Vatankhah (2013) estudió el flujo a través de secciones semirrectangulares, y así muchos más.

Diversos estudios en hidráulica aplicada han demostrado la utilidad de los modelos físicos y electromecánicos para la comprensión de fenómenos de flujo en canales abiertos (Chanson, 2009; Wang, 2011). Asimismo, la incorporación de energías limpias y tecnologías de automatización se ha consolidado como un eje fundamental en el diseño de equipos de laboratorio orientados a la sostenibilidad (Apel, 2009; Kumbhakar, 2017). Sin embargo, aún persiste la necesidad de integrar ambos enfoques en una propuesta didáctica autosostenible que pueda ser replicada en instituciones de educación superior.

En este trabajo se propone el diseño de un equipo electromecánico en donde se puedan estudiar diferentes fenómenos hidráulicos a lo largo de un canal de sección trapecial con pendiente variable, con la alternativa de poder conectarse a la red eléctrica; prioritariamente dependerá del uso de energía solar generada por paneles solares, automatizado, con control de flujo mediante válvulas y compuertas, así como vertederos de descarga.

El objetivo general es desarrollar y calcular dicho equipo, asegurando su autonomía energética, funcionalidad experimental y contribución a la sostenibilidad en la formación de recurso humano.

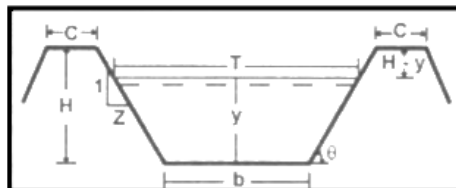
El presente estudio se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara. La metodología se estructuró en cinco diferentes fases: diseño geométrico del canal, dimensionamiento hidráulico, selección y especificación de la bomba y del sistema de impulsión, configuración de instrumentación y control y diseño energético basado en un arreglo fotovoltaico.

2. Materiales y métodos

El equipo fue concebido para simular condiciones controladas de flujo en un canal trapezoidal a escala de laboratorio. Se establecieron parámetros geométricos (dimensiones de la base menor, taludes y pendiente del canal) mediante cálculos hidráulicos que describen los fenómenos que ocurren en los sistemas de fluidos. Considerando la continuidad, determinación de caudal, velocidad de flujo y la pérdida de carga, facilitan el diseño y la optimización de los mismos. Dichas ecuaciones se describen a continuación; los elementos geométricos de la sección transversal de un canal se muestran en la Figura 1.

Figura 1

Elementos geométricos de la sección transversal de un canal



Fuente: Marin et al., 2013

donde:

y = tirante de agua, es la profundidad máxima del agua en el canal

b = ancho de solera, es el ancho de la base de un canal,

T = espejo de agua, es el ancho de la superficie libre del agua

C = ancho de corona

H = profundidad total del canal

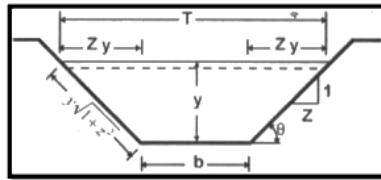
H-y= bordo libre

θ = ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal

Z = talud, es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral

La Figura 2 muestra las relaciones geométricas correspondientes al área hidráulica (A), perímetro mojado (p), espejo de agua (T) y radio hidráulico (R) de las secciones transversales (Villón 2007).

Figura 2
Sección trapezoidal



Fuente: Villón 2007

De la literatura se toman las ecuaciones a utilizar para la obtención de los valores propios del canal.

Ecuación de continuidad (Mijares, 1989):

$$Q = A V \quad (1)$$

donde:

Q = caudal, m^3/s

A = Área de la sección transversal, m^2

V = velocidad del fluido. m/s

Ecuación de Bernoulli con pérdidas o ecuación de la energía (White, 2008; Espert et al., 2018):

$$z_1 + p_1/\gamma + V_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/(2g) + h_L \quad (2)$$

donde:

z = energía potencial.

p/γ = energía de presión.

$V^2/(2g)$ = energía cinética

h_L = pérdidas de energía debidas a la fricción.

Ecuación de Darcy-Weisbach (Bustos y Montoya, 2015):

$$h_f = f \cdot (L/D_h) \cdot (V^2/(2g)) \quad (3)$$

donde:

h_f = pérdida de carga, m

f = factor de fricción.

L = longitud de la tubería, m

d = diámetro interior de la tubería, m

v = velocidad del fluido, m/s

g = aceleración debida a la gravedad, m/s²

La suma de las pérdidas de carga locales en un sistema de tuberías (Chadwick, 2012):

$$h_l = \Sigma(K_i \cdot V^2/(2g)) \quad (4)$$

donde:

h_l = pérdida de carga total

K_i = coeficiente de pérdida local para cada componente del sistema.

V = velocidad del fluido (m/s)

g = aceleración de la gravedad, 9,8 m/s²

La fórmula de Manning para calcular la velocidad media del flujo en canales abiertos (Riveros, 2024):

$$V = (1/n) \cdot R_h^{(2/3)} \cdot S_0^{(1/2)} \quad (5)$$

donde:

V = velocidad media del flujo, m/s

n = coeficiente de rugosidad de Manning, valor adimensional que depende del material y la condición de la superficie del canal.

R_h = Es el radio hidráulico, calculado como el área de la sección transversal del flujo dividida por el perímetro mojado.

S₀ = pendiente del fondo del canal.

Radio hidráulico (Villón, 2007):

$$R_h = A/P \quad (6)$$

R_h = Es el radio hidráulico, m

A = Área mojada, m²

P = Perímetro mojado, m

3. Diseño experimental

Para el diseño del canal se propone una base menor, la cual nos permita conocer las dimensiones de la sección trapecial. La base menor que se propone es de 8 cm; en las demás medidas se considera una inclinación óptima de las paredes del canal, donde tomamos como fundamentos principales lo siguiente: Según la ecuación que se muestra a continuación, el “factor de gasto o conductividad de una sección de canal” se incrementa con el aumento del radio hidráulico o la disminución en el perímetro mojado (Chow, 1959), es decir:

$$K = CA \sqrt{R} = CA \sqrt{(A/P)} \quad (7)$$

donde:

K = factor de gasto o caudal o caudal característico, m³ /s

C= coeficiente de rugosidad de Chézy

A = área hidráulica del canal, m²

R = radio hidráulico del canal, m

Sabiendo que:

$$K = Q/\sqrt{S0}$$

donde:

Q = Caudal de diseño m^3/s

$S0$ = pendiente del canal

Sustituyendo:

$$Q/\sqrt{S0} = CA \sqrt{R} = CA\sqrt{(A/P)}$$

Se sabe que:

$$C = (R^{(1/6)})/n$$

Sustituyendo términos finalmente queda:

$$(Q \times n) / \sqrt{S0} = (A^{5/3})/(P^{2/3})$$

Analizando la ecuación anterior notamos que, teniendo un valor máximo del caudal Q obtendremos R_{max} , que corresponde a un valor mínimo del perímetro mojado P_{min} . Es decir:

$$(Q \times n) / \sqrt{S0} = (A^{5/3})/(P_{min}^{2/3})$$

Al buscar el perímetro mojado mínimo para un área y sección dada, considerando $S0$ constante igual a cero, donde:

$$A = (b + t \cdot h) \cdot h$$

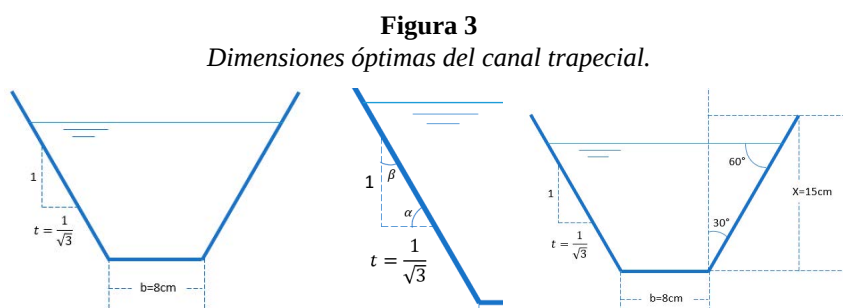
y

$$P = b + 2 \cdot h\sqrt{t^2 + 1}$$

Derivando el talud la ecuación queda como:

$$t = \pm\sqrt{1/3} = 1/\sqrt{3}$$

Con lo anterior se pueden completar las dimensiones óptimas del canal, Figura 3.



Fuente: elaboración propia

Con el valor del talud óptimo se definió la geometría completa del canal. La altura total adoptada fue de 15 cm, lo que permitió calcular la base mayor y la longitud de las paredes inclinadas. La proyección horizontal de cada talud se obtuvo mediante la expresión:

$$a = h \cdot \tan(60^\circ) = 15 \cdot 1.732 = 8.66 \text{ cm}$$

y, en consecuencia, la base mayor se calculó como:

$$B = a + b + c = 8.66 + 8 + 8.66 = 25.33 \text{ cm}$$

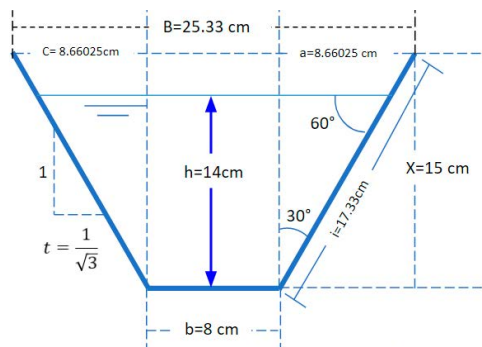
La longitud de las paredes inclinadas resultó:

$$i = h \cdot \sec(60^\circ) = 15 \cdot 1.155 = 17.33 \text{ cm.}$$

Quedando definida la sección transversal del canal con una base menor de 8 cm, una base mayor de 25.33 cm, una altura de 15 cm y paredes inclinadas de 17.33 cm de longitud, con base en las ecuaciones propues-

tas del cálculo del caudal y las dimensiones de diseño y siendo la altura del canal de 15 cm, se propone como tirante máximo (h) un valor de 14 cm (Figura 4).

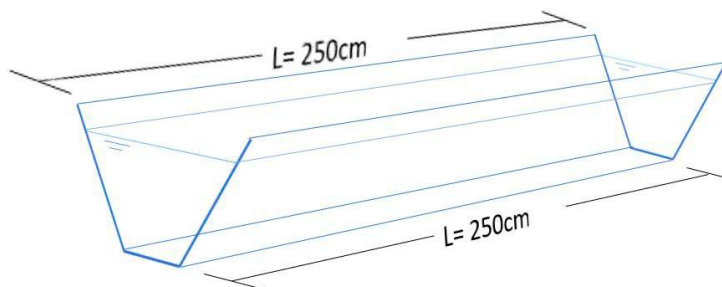
Figura 4
Sección transversal del canal con tirante máximo.



Fuente: elaboración propia

Una vez dimensionada la sección del canal trapezoidal de forma frontal (corte transversal), se propuso una longitud del canal de 250 cm. Para un desempeño correcto, donde se realizarán experimentos, Figura 5.

Figura 5
Largo del canal, sección óptimo.



Fuente: elaboración propia

El cálculo de la capacidad hidráulica de la sección se realizó con un tirante máximo de 14 cm (0.14 m), ligeramente inferior a la altura total del canal, lo que asegura un margen de seguridad durante los ensayos.

El área hidráulica se determinó a partir de la expresión:

$$A = (b + (y / \tan(\beta))) \cdot y$$

al sustituir los valores de diseño se obtuvo:

$$A = (0.08 + 0.14/\sqrt{3})(0.14) = 0.0225 \text{ m}^2$$

De esta manera, el área hidráulica de la sección trapezoidal quedó definida en 0.022516 m².

El dimensionamiento final del canal incluye una base menor de 0.08 m, una base mayor de 0.253 m, una altura de 0.15 m, un tirante máximo de 0.14 m, paredes inclinadas de 0.173 m, un área hidráulica de 0.0225 m² y una longitud total de 2.50 m.

Estos valores fueron confirmados mediante la elaboración de diagramas y un modelo 3D en AutoCAD, lo que permitió visualizar con precisión la geometría del canal y su viabilidad para el desarrollo de experimentos hidráulicos.

Sustituyendo valores en la ecuación de caudal y calculando la velocidad del flujo mediante la ecuación de Mannig, así como del radio hidráulico, y proponiendo una pendiente máxima resultante de la experimentación y ensayos se tiene que:

$$Q = V \cdot A$$

$$\begin{aligned} V_{\text{max propuesta}} &= 2.5 \text{ m/s} \\ S_0 &= 0.001 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= (0.5132418727 \text{ m/s})(0.02251606528 \text{ m}^2) \\ Q &= 0.01155618751 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Si el Área transversal máxima del canal = 0.02251606528 m², y la longitud del canal es de 250 cm se calcula el volumen máximo retenido dentro del canal, de las tuberías y del tanque de tranquilización, los valores resultantes se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Volúmenes retenidos en los componentes principales del sistema.

Componente	Descripción	Volumen	Unidad
Tanque de tranquilización	Volumen total retenido	0.041928645	m ³
Tubería 1	Volumen retenido (L=1.13 m; Ø≈80 mm)	0.005651635	m ³
Tubería 2	Volumen retenido (L=0.575 m; Ø≈80 mm)	0.002875832	m ³

Fuente: elaboración propia

Se dimensionaron bombas de impulsión y mini turbinas hidráulicas según requerimientos de potencia. Se calculó la carga útil (la ganancia en metros que deberá tener la bomba para satisfacer el sistema y vencer las pérdidas por fricción) aplicando la ecuación de Bernoulli de balance energético. Se consideró una eficiencia de la bomba del $\eta = 70 \%$, cubriendo un margen de posibles pérdidas internas de la bomb. Se hizo una investigación y revisión de diferentes equipos de bombeo a través de catálogos y fichas técnica; se seleccionó una bomba Altamira serieFluxx 12 para 12 litros, de 4 HPP, 3 kWw de 3 fases de 230 V/460 Vv, amperaje de 12-6.

En lo que respecta al control y medición del caudal, se optó por un caudalímetro electromagnético compuesto por un transmisor y un sensor que miden el caudal de manera conjunta. El sensor del caudalímetro magnético se coloca en línea y mide una tensión inducida generada por el líquido a medida que fluye por la tubería. El transmisor toma la tensión generada por el sensor, la convierte en una medición de caudal y transmite esta medición a un sistema de control. Para el cálculo de los paneles solares, se consideró la irradiación solar en las horas pico en Guadalajara, Jalisco, México, siendo 5.89 h la demanda energética total del equipo de 4 kW y operación del equipo por 6 horas; se obtuvo un requerimiento de 24 kWh. Se seleccionó un panel que es un conjunto de 4 paneles con una potencia de salida de 540 watts.

$$\text{numero de paneles} = \frac{\text{potencia requerida por día del equipo}}{(\text{hora solar pico})(\text{potencial del panel})}$$

$$\text{numero de paneles} = \frac{24000 \text{ Watt} \cdot \text{hora} / \text{día}}{(5.89 \text{ hora} / \text{día})(540 \text{ Watt} / \text{panel})}$$

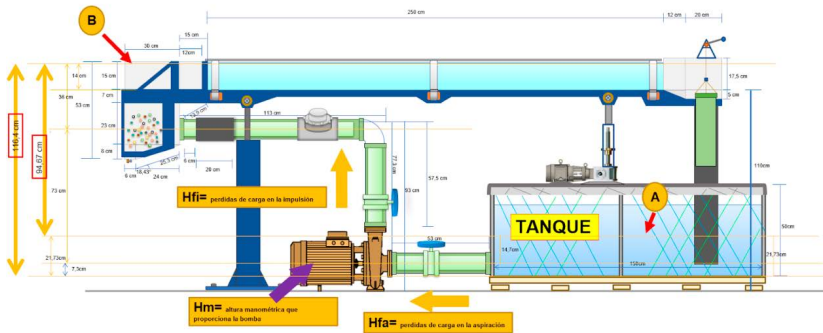
número de paneles = $7.55 \approx 8$

Por lo anterior se requieren dos conjuntos de paneles solares.

4. Resultados

Los resultados geométricos y energéticos obtenidos son consistentes con el objetivo central de diseñar un equipo electromecánico sostenible para experimentación hidráulica en canal trapezoidal. La sección óptima derivada del criterio de mínimo perímetro mojado (talud $t=1/\sqrt{3}$, ángulo de 60°) permite maximizar la conductividad hidráulica para un área dada, lo que se refleja en el área hidráulica calculada ($A \approx 0.0225 \text{ m}^2$) con dimensiones compactas ($b=0.08 \text{ m}$, $B \approx 0.253 \text{ m}$, $h=0.15 \text{ m}$). La elección de tirante máximo ($y=0.14 \text{ m}$) deja un margen libre de 1 cm por debajo de la altura, suficiente para ensayos en régimen controlado. Los volúmenes de almacenamiento obtenidos fueron 0.0419 m^3 en el tanque de tranquilización, $5.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ en la tubería principal y $2.88 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ en la tubería secundaria (Figura 6).

Figura 6
Proyección del equipo didáctico.

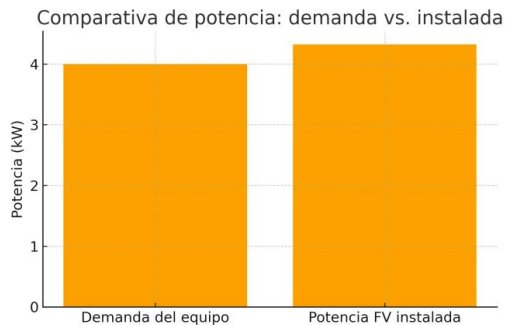


Fuente: elaboración propia

En el frente energético, el sistema fotovoltaico se dimensionó con 8 paneles de 540 W, la potencia fotovoltaica instalada (4.32 kW) frente a la demanda (4.0 kW) otorga $\sim 8\%$ de margen (Figura 6), mientras que la energía diaria estimada (≈ 25.46 kWh/día) supera a la requerida (24 kWh/día) en $\sim 6\%$ (Figura 7). Esta cobertura sugiere que, bajo las horas sol pico consideradas, el arreglo fotovoltaico puede sostener la operación prevista.

Figura 7

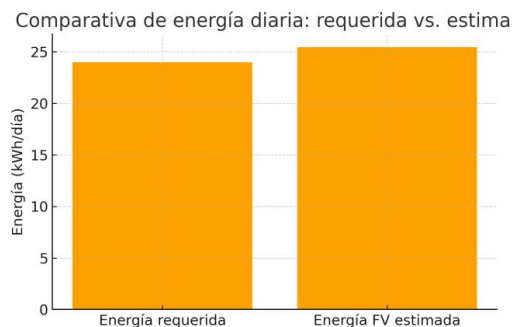
Comparativa de potencia: demanda del equipo, 4.0 kW vs. potencia fotovoltaica instalada 4.32 kW.



Fuente: elaboración propia

Figura 8

Comparativa de energía diaria requerida 24 kWh/día vs. estimada 25.46 kWh/día



Fuente: elaboración propia

5. Conclusiones

El estudio confirma la viabilidad técnica de un equipo electromecánico sostenible para la experimentación de fenómenos hidráulicos en canal trapezoidal a escala de laboratorio, integrando fuentes renovables, automatización e instrumentación para adquisición de datos en tiempo real.

Comparando con la literatura, el uso de la sección hidráulica óptima para canales trapezoidales coincide con formulaciones clásicas de hidráulica de cauces abiertos y con prácticas didácticas en laboratorios universitarios. El enlace fotovoltaica-bombeo también es coherente con tendencias de sostenibilidad y eficiencia energética en equipos experimentales.

Las implicaciones del estudio incluyen aplicaciones directas en docencia, fortaleciendo la formación en hidráulica y energías renovables; mejoras en eficiencia energética al reducir consumo de red; posibilidad de replicar el diseño en otros laboratorios; y gestión más eficiente del recurso hídrico al cuantificar volúmenes retenidos y fomentar el reúso.

En síntesis, el diseño propuesto cumple los objetivos de sostenibilidad, funcionalidad y trazabilidad de datos para un canal trapezoidal de laboratorio, y establece una plataforma robusta para docencia e investigación aplicada.

Referencias

- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyses—How detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79–98. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>
- Bustos, P., & Montoya, J. (2015). *Desarrollo de software para la comparación de la velocidad de un canal abierto utilizando el factor de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning* [Monografía de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/>
- Castellanos, H. E., Collazos, C. A., Farfán, J. C., & Meléndez-Pertuz, F. (2017). Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable. *Información Tecnológica*, 28(6), 103–114. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000600013>

- Chadwick, A. J. (2012). Coeficientes de pérdida de carga en accesorios. En *Hydraulics in civil and environmental engineering*. CRC Press.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier.
- Chanson, H. (2009). *Hydraulics of open channel flow: An introduction* (2.^a ed.). Elsevier.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (2005). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Esperter Alemany, V. B., García-Serra García, J., Cabrera Marcet, E., et al. (2018). *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua* (Vols. I y II). Instituto Tecnológico del Agua, Universitat Politècnica de València.
- Gleick, P. H. (2003). *Agua para la vida: El agua y el futuro de la humanidad*. Island Press.
- Jacobsen, T. (1976). *The treasures of darkness: A history of Mesopotamian religion* (Vol. 326). Yale University Press.
- Kumbhakar, M. K. (2017). IoT enabled smart water management system: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 19*, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.011>
- Naudascher, E. (2002). *Hidráulica de canales: Diseño de estructuras*. Editorial Limusa.
- Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2001). *Estructuras hidráulicas*. McGraw-Hill.
- Marín, C. A., Menjívar, M. J., & Zavaleta, J. M. (2012). *Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable para uso didáctico e investigación* [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio UES.
- Mijares, F. J. A., & Verduzco, M. B. (1989). Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en la hidráulica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 40–45.
- Mumford, L. (1961). *The city in history: Its origins, its transformations, and its prospects* (Vol. 67). Houghton Mifflin Harcourt.
- Riveros, D. (2004). *Desarrollo de una metodología para la determinación de coeficientes de resistencia hidráulica asociados a tramos de alcantarillados existentes* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio PUJ.

- Swamee, P. K., & Chahar, B. R. (2013). Optimal alignment of a canal route. *Water Management*, 166(8), 422–431. <https://doi.org/10.1680/wama.11.00097>
- Vatankhah, A. R. (2014). Semi-regular polygon as the best hydraulic section in practice (generalized solutions). *Flow Measurement and Instrumentation*, 38, 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.07.002>
- Villón Béjar, M. (2008). *Hidráulica de canales* (2.^a ed.). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Wang, H. L. (2011). Hybrid modeling of flow and pollutant transport in rivers. *Journal of Environmental Engineering*, 137(8), 694–703. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000371](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000371)
- White, F. M. (2008). *Mecánica de fluidos* (6.^a ed.). McGraw-Hill.