

# Modelo Hidráulico para Redes de Canales con Estructuras Hidráulicas

## Hydraulic Model for Channel Networks with Hydraulic Structures

Félix Santiago Collazo<sup>1</sup>, Walter Silva Araya<sup>2</sup>

---

Santiago Collazo, F; Silva Araya, W. Modelo Hidráulico para Redes de Canales con Estructuras Hidráulicas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32, Especial. XIII CLIA. Abril 2019. Pág 100-108.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4267>

1 Graduado de Maestría de la Universidad de Puerto Rico, Mayagüez. Puerto Rico. Correo electrónico: felix.santiago10@upr.edu

2 Profesor, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez. Puerto Rico. Correo electrónico: walter.silva2@upr.edu



## Palabras clave

Redes de canales; flujo gradualmente variado; método de solución simultánea para canales; análisis y diseño de estructuras hidráulicas.

## Resumen

Muchos sistemas de irrigación contienen sistemas de canales complejos que incluyen estructuras de control. La regulación y control de la distribución de agua para regar los cultivos es necesaria para una agricultura sostenible. El diseño y análisis de estructuras hidráulicas es esencial para la conservación y el uso eficiente del agua dentro del sistema. Este artículo presenta las capacidades de un modelo hidráulico para resolver redes de canales con estructuras hidráulicas. El algoritmo utiliza el Método de Solución Simultánea (MSS) para resolver las ecuaciones de continuidad y energía en varios tramos del canal. Los resultados obtenidos incluyen profundidades del agua, distribución de flujos y dimensionamiento de estructuras hidráulicas. Se presentan dos aplicaciones: la modelación de un tramo del Distrito de Riego del Valle de Lajas (DRVL) de Puerto Rico y una red de canales con diseño y análisis de diferentes estructuras hidráulicas. El MSS ha probado ser excelente para aplicaciones prácticas debido a su fácil uso, capacidades y precisión.

## Keywords

Channel network; gradually-varied flow; simultaneous solution method; analysis and design of hydraulic structures.

## Abstract

Many irrigation systems comprise complex channel systems including control structures. Regulation and control of water distribution for crop irrigation is necessary for sustainable agriculture. Design and analysis of hydraulic structures is essential for efficient use and conservation of water. This article presents the capabilities of a hydraulic model for solution of channel networks with hydraulic structures. The algorithm uses the Simultaneous Solution Method (SSM) to solve the continuity and energy equations in several channel reaches. The results include water depths, distribution of flows and dimensions of hydraulic structures. Two applications are presented: modeling of a reach of the Lajas Valley Irrigation System in Puerto Rico and, a channel network with design and analysis of different hydraulic structures. The SSM proved to be excellent for practical applications due to ease of use, capabilities and precision.

## Introducción

Los perfiles de la profundidad del agua para condiciones de flujo permanente y gradualmente variado se obtienen resolviendo las ecuaciones de conservación de energía y conservación de volumen, conocida como la ecuación de continuidad, a lo largo de un canal. Existen diversos métodos para resolver este conjunto de ecuaciones, algunos usan las ecuaciones en forma diferencial y otros las usan en forma integrada. Entre los que usan las ecuaciones en forma integrada destacan el Método de Paso Directo y el Método del Paso Estándar. En su forma más común ambos métodos calculan la profundidad del agua en una sección transversal del canal cuando se conoce el nivel en la sección anterior. O sea, se resuelve una sección a la vez. Cada canal se divide en varias secciones para obtener el perfil del agua con mayor detalle. Sin embargo estos métodos se complican o son imprácticos cuando se trata de canales paralelos o de redes de canales. El Método de Solución Simultánea (MSS), descrito en la próxima sección, permite resolver cualquier sistema, siendo especialmente adecuado para redes o sistemas complejos de canales. El método resuelve las ecuaciones de conservación de energía y de continuidad para todas las secciones en que se divide el canal, y para todos los canales del

sistema de manera simultánea. En el algoritmo mostrado en este artículo se incluyen dentro de la solución simultánea el diseño y análisis de estructuras hidráulicas tales como vertedores laterales, compuertas y sifones. Esto lo convierte en una herramienta de gran utilidad para uso en sistemas de irrigación.

## Metodología

La ecuación de energía entre dos secciones transversales denotadas por el subíndice  $j$  y  $j+1$  de un canal puede expresarse como [1]:

$$F_{i,k} = z_{i,j+1} - z_{i,j} + y_{i,j+1} - y_{i,j} + \alpha_i \frac{Q_{i,j+1}|Q_{i,j+1}|}{2gA_{i,j+1}^2} - \alpha_i \frac{Q_{i,j}|Q_{i,j}|}{2gA_{i,j}^2} + \frac{1}{2}(x_{i,j+1} - x_{i,j}) \left( \frac{Q_{i,j+1}|Q_{i,j+1}|n_i^2}{C_o^2 A_{i,j+1}^2 R_{i,j+1}^{1.33}} + \frac{Q_{i,j}|Q_{i,j}|n_i^2}{C_o^2 A_{i,j}^2 R_{i,j}^{1.33}} \right) = 0 \quad (1)$$

Donde  $Q$  = caudal;  $z$  = elevación del fondo del canal;  $y$  = profundidad del agua;  $\alpha$  = coeficiente de corrección por distribución de velocidades;  $g$  = aceleración de la gravedad;  $x$  = distancia horizontal;  $A$  = área de flujo;  $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning;  $R$  = radio hidráulico;  $C_o$  = coeficiente del sistema de unidades; para el Sistema Internacional de unidades use 1.0 y para el sistema Británico use 1.49;  $i$  = subíndice que se refiere al número del canal;  $j$  = subíndice que se refiere al número de la sección transversal del canal  $i$ ; y  $k$  = subíndice que se usaría para identificar cada ecuación dentro de la matriz que se construye cuando se forma el sistema de todas las ecuaciones entre cada tramo.

Si se tienen  $M$  canales y cada uno se divide en  $N_i$  tramos en cada canal, el número total de secciones en los  $M$  canales es  $\sum_{i=1}^M (N_i + 1)$ . Si se busca la profundidad del agua en cada sección, se requiere el mismo número de ecuaciones que de incógnitas para resolver por todas ellas.

El número total de ecuaciones de energía entre dos secciones es  $\sum_{i=1}^M N_i$ . Además en la unión entre dos canales se debe satisfacer también la ecuación de energía, lo cual provee  $M-1$  ecuaciones más. La ecuación faltante para completar el sistema la provee una condición de borde para la primera o la última sección de los canales. Las ecuaciones de energía (Ecuación 1) tienen términos que dependen de la profundidad y que están elevados a una potencia, estos son el área y el radio hidráulico. Por lo tanto, al organizar todas las ecuaciones para resolverse simultáneamente se forma un sistema de ecuaciones no-lineales. El Método de Solución Simultánea (MSS) consiste en resolver este sistema de ecuaciones. Si se trata de canales paralelos o redes de canales, entonces el sistema deberá incluir las ecuaciones de continuidad en los sitios donde un canal se separa en dos o más, y donde se unen dos o más canales. Existe un limitado número de algoritmos para resolver sistemas de canales [2, 3, 4], sin embargo los mismos han sido de poco alcance ya que solamente resuelven por caudales y profundidades del agua en los canales, sin considerar estructuras para distribución o control del agua. Es común que en un sistema de canales existan estructuras hidráulicas tales como vertedores, compuertas y sifones invertidos. En estos casos las ecuaciones de las estructuras se deben incluir dentro del sistema de ecuaciones simultáneas. El resultado es un conjunto numeroso de ecuaciones no lineales que, para su solución requiere de métodos numéricos capaces de resolver eficazmente matrices grandes de sistemas mal-condicionados [5]. Este artículo presenta un modelo computadorizado para resolver redes de canales con las siguientes capacidades:

1. Permite resolver canales en serie, canales paralelos y redes de canales usando el MSS.
2. Incluye el diseño y/o análisis de vertedores laterales, compuertas y sifones invertidos.

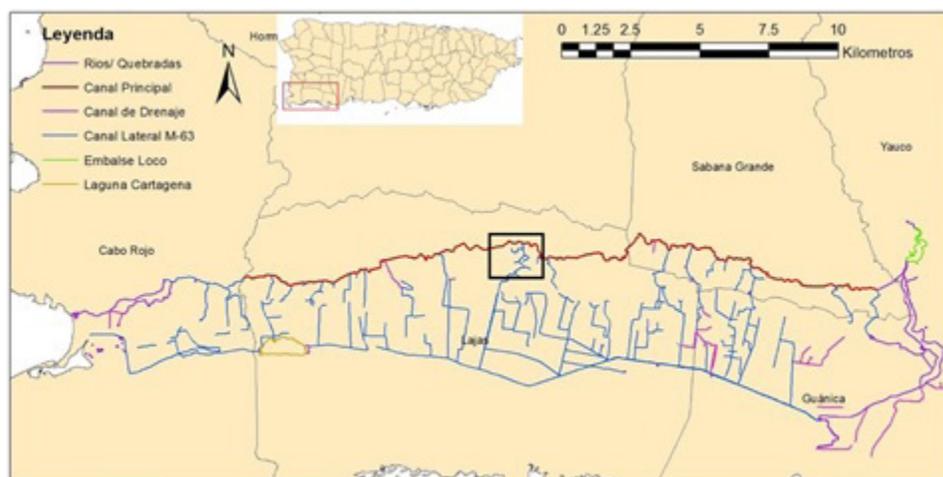
3. Resuelve sistemas grandes de ecuaciones no-lineales usando el método de Newton-Raphson. Este método aproxima la solución iterativamente resolviendo las ecuaciones linealizadas sucesivamente hasta tener convergencia [6].
4. Las ecuaciones lineales se resuelven con el método Gradiente Biconjugado Estabilizado con Precondicionador (BiCGSTAB por sus siglas en inglés) el cual es apropiado para sistemas lineales, no-simétricos y con matrices dispersas [7].

Detalles del MSS y como se añaden las estructuras hidráulicas dentro del algoritmo se pueden obtener en Santiago-Collazo y Silva-Araya [8]. A continuación se presentan dos casos donde se aplicó el MSS con estructuras hidráulicas. El primer caso es un tramo del Sistema de Irrigación del Valle de Lajas en el suroeste de Puerto Rico; el segundo caso muestra una red de canales con varias estructuras laterales, algunas son diseñadas y otras son analizadas. El modelo resuelve por los flujos, profundidades y dimensiones de todas las estructuras de manera simultánea. Este algoritmo fue programado en MATLAB y la entrada de los datos se puede realizar utilizando una interface gráfica.

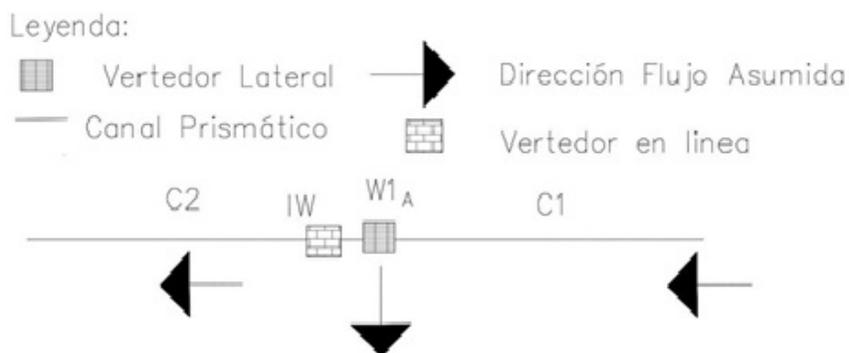
## Resultados y Discusión

### Caso I: Tramo del Sistema de Irrigación del Valle de Lajas, Puerto Rico

El Sistema de Irrigación del Valle de Lajas, mostrado en la figura 1, consiste de aproximadamente 330 salidas de agua para irrigar tierras agrícolas. Además, alimenta cuatro plantas de tratamiento de agua potable para suministrar agua a cinco municipios del suroeste de Puerto Rico. Es el sistema de irrigación más importante de la Isla. El tramo analizado, mostrado en el recuadro negro, consiste de un desvío de agua formado por un vertedor lateral y un vertedor en el canal principal ubicado aguas abajo muy cerca uno del otro. El propósito de vertedor en el canal principal es elevar el nivel del agua para aumentar el desvío de agua hacia las parcelas a través del vertedor lateral. El conjunto de vertedores y los canales se muestran esquemáticamente en la figura 2. La figura 3 muestra una foto del levantamiento de campo en donde se observa el vertedor en el canal principal. Se levantaron secciones transversales, se midieron las profundidades, se usó el método de área-pendiente para estimar los caudales y se estimó la rugosidad de los canales. El cuadro 1 presenta las características de los canales trapezoidales C1 y C2, así como de los vertedores mostrados en la figura 2. El vertedor del canal principal presenta una discontinuidad en el perfil del agua. Para incluirlo en el sistema de ecuaciones del MSS se asumió profundidad normal aguas abajo del vertedor.



**Figura 1.** Esquemático del Sistema de irrigación del Valle de Lajas. Área de estudio dentro del recuadro



**Figura 2.** Esquemático utilizado para simular los vertedores



**Figura 3.** Levantamiento de datos de campo. Vertedor en el canal principal

**Cuadro 1.** Características de los canales para el Caso 1: Sistema de Irrigación del Valle de Lajas

ID Canal	Largo Canal (m)	Pendiente Fondo (m/m)	Coefficiente Rugosidad Manning	Ancho Fondo (m)	Pendiente Lateral (m/m)	Cantidad de Tramos	Elevación Fondo Aguas Arriba (m)
C1	168.36	0.0007	0.047	1.29	1:1.62	15	47.325
C2	310.84	0.0007	0.047	1.64	1:1.58	15	47.207
ID Vertedor Lateral	Tipo	Distancia Canal (m) <sup>+</sup>	Altura de Cresta (m)	Largo de Vertedor (m)	Flujo del Vertedor (m <sup>3</sup> /s)		
W1 <sub>A</sub>	Análisis	0.585	1.829	0.1035*	31.5*		

\*Valores que son parte de los resultados del Método de Solución Simultanea.  
+ Distancia desde el comienzo aguas arriba del canal hasta la localización del vertedor.

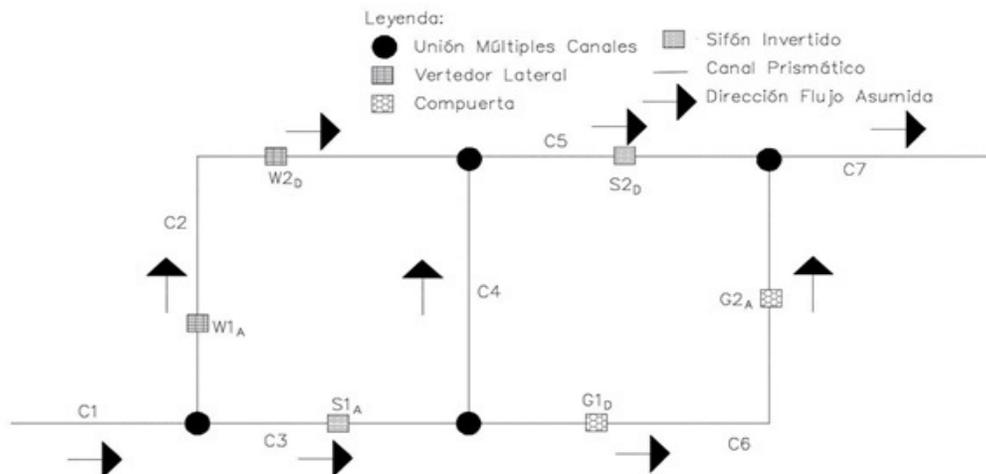
Los resultados obtenidos con el modelo fueron comparados con los valores de profundidad medidos. Se calibró los caudales ajustando el coeficiente de Manning y el coeficiente de descarga del vertedor. La rugosidad se redujo un 6.7% y el coeficiente de descarga un 12.8%. Los valores finales del coeficiente de vertedor y la rugosidad fueron 3.14 y 0.041 respectivamente. El cuadro 3 presenta los perfiles de agua obtenidos. Los porcentajes de calibración indican que el modelo reprodujo las condiciones de campo con precisión, considerando los errores esperados en las mediciones y otras incertidumbres. Este Caso 1 muestra las capacidades del MSS para simular vertedores en una confluencia (cuadro 2). El Caso 2 mostrará las capacidades para resolver sistemas de redes con estructuras incluidas.

**Cuadro 2.** Resumen de los resultados para Caso 1: Sistema de Irrigación del Valle de Lajas.

	Sección	Distancia (m)	Profundidad (m)		Sección	Distancia (m)	Profundidad (m)
Canal 1	1	0	0.6100	Canal 2	1	0	0.3851
Q= 0.329	3	22.45	0.6185	Q= 0.2255	3	41.45	0.3890
m <sup>3</sup> /s	5	44.90	0.6274	m <sup>3</sup> /s	5	82.89	0.3940
	7	67.34	0.6366		7	124.34	0.4001
	9	89.79	0.6463		9	165.78	0.4077
	11	112.24	0.6562		11	207.23	0.4169
	13	134.69	0.6666		13	248.67	0.4277
	15	157.14	0.6772		15	290.12	0.4403
	16	168.36	0.6827		16	310.84	0.4473

### Caso 2: Tramo del Sistema de Irrigación del Valle de Lajas, Puerto Rico

La red de canales se muestra esquemáticamente en la figura 4. Consiste en una red con siete (7) canales. En la red existen un vertedor lateral  $W1_A$ , un sifón  $S1_A$  y una compuerta  $G2_A$ . Se añadirá un sifón  $S2_D$ , un vertedor  $W2_D$  y una compuerta  $G1_D$  para desviar agua a otras fincas. Las primeras tres estructuras fueron analizadas para determinar cuánta agua suministran. Las últimas tres fueron diseñadas, o sea, se determinan el diámetro del sifón, el largo de la compuerta y del vertedor tal que cumplan con los caudales de demanda que se desean distribuir. El programa resuelve para todas las condiciones en forma simultánea, de esta manera no es necesario ningún procedimiento de prueba y error. El cuadro 3 presenta las propiedades de cada canal según la notación de la figura 4. Este sistema convergió en 11 iteraciones. La tolerancia para los valores de las correcciones en el algoritmo de Newton Raphson fue de 0.0001.



**Figura 4.** Esquemático de red de canales con estructuras

**Cuadro 3.** Propiedades geométricas y de rugosidad para el sistema de redes del Caso 2

ID Canal	Largo Canal (m)	Pendiente Fondo (m/m)	Coefficiente Rugosidad Manning	Ancho Fondo (m)	Pendiente Lateral (m/m)	Cantidad de Tramos	Elevación Fondo Aguas Arriba (m)
C1	1250	0.0005	0.03	2.0	1:1.5	10	100.0
C2	3600	0.0005	0.03	2.0	1:1.5	10	99.375
C3	1275	0.001	0.03	0.6	1:1.5	10	99.375
C4	525	0.001	0.03	0.6	1:1.5	10	98.1
C5	2950	0.0005	0.03	2.0	1:1.5	10	97.575
C6	2000	0.001	0.03	0.6	1:1.5	10	98.1
C7	1250	0.0005	0.03	2.0	1:1.5	10	96.1

Los resultados de profundidad de agua en los canales se muestran en el cuadro 4. Los cuadros 5 y 6 muestran los resultados para los vertedores, compuertas y sifones.

**Cuadro 4.** Resumen del diseño y análisis de vertedores laterales en el sistema de redes del Caso 2.

ID Vertedor Lateral	Tipo	Distancia Canal (m) <sup>+</sup>	Altura de Cresta (m)	Largo de Vertedor (m)	Flujo del Vertedor (m <sup>3</sup> /s)	Flujo a través del Vertedor (%)
W1 <sub>A</sub>	Análisis	1000	1.8	1.0	0.96	27.2*
W2 <sub>D</sub>	Diseño	2600	1.8	0.31*	0.85	25.0

\*Valores que son parte de los resultados del Método de Solución Simultanea.

<sup>+</sup> Distancia desde el comienzo aguas arriba del canal hasta la localización del vertedor.

**Cuadro 5.** Resumen del diseño y análisis de las compuertas en el sistema de redes del Caso 2.

ID Vertedor Lateral	Tipo	Distancia Canal (m) <sup>+</sup>	Apertura Compuerta (m)	Largo de Compuerta (m)	Flujo de la Compuerta (m <sup>3</sup> /s)	Flujo a través de la Compuerta (%)
G1 <sub>D</sub>	Diseño	500	0.4	0.32*	0.64	23.0
G2 <sub>A</sub>	Análisis	1500	0.2	0.70	0.80	33.8*

\*Valores que son parte de los resultados del Método de Solución Simultanea.  
+ Distancia desde el comienzo aguas arriba del canal hasta la localización de la compuerta.

**Cuadro 6.** Resumen del diseño y análisis de sifones invertidos en el sistema de redes del Caso 2.

Parámetro / ID Sifón Invertido	S1 <sub>A</sub>	S2 <sub>D</sub>
Tipo	Análisis	Diseño
Largo (m)	50	70
Pendiente Fondo (m/m)	0.002	0.004
Pendiente Fricción (m/m)	0.0009*	0.0033*
Diámetro (m)	2.0	1.52 *
Carga Disponible (m)	0.0015*	0.0053*
Pérdidas Totales Carga (m)	0.050*	0.213*
Flujo Operacional (m <sup>3</sup> /s)	3.48*	3.25*
Velocidad de Flujo Operacional (m/s)	1.11*	1.78*
* Valores que son parte de los resultados del Método de Solución Simultanea.		

## Conclusiones

Este artículo presenta dos casos aplicaciones de un nuevo algoritmo de solución simultánea de canales complejos con estructuras hidráulicas incluidas. En el primer caso el modelo se usó para simular un tramo del sistema de riego del Valle de Lajas en Puerto Rico. La calibración con datos medidos en el campo requirió de ajustes del 6.7% y 12.8 % en el coeficiente de Manning y en el coeficiente de descarga del vertedor respectivamente. Estos ajustes están dentro de los errores esperados para aplicaciones en estos sistemas. El segundo caso consiste de un sistema de redes con vertedores, compuertas y sifones en cual, se resolvieron simultáneamente condiciones de diseño y análisis de dichas estructuras. La solución del sistema no-lineal de ecuaciones convergió en once iteraciones, lo cual demuestra la eficiencia y capacidad de este modelo. Sus capacidades superan la complejidad de problemas que se resuelven usando programas de computadora de flujo gradualmente variado de uso generalizado como HEC-RAS [9].



## Referencias

- [1] M. H. Chaudhry and A. M. Schulte. "Gradually-varied flows in open-channel network," in *Jour. Hydr. Res.*, vol 25, no. 3, pp. 357-371, Mar. 1987.
- [2] A. Islam, N. S. Raghuvanshi and R. Singh. "Development and Application of Hydraulic Simulation Model for Irrigation Canal Networks" in *Jour. of Irrig. Drain Eng.*, vol. 10. (, pp. 134: 149, October, 2008.
- [3] H. P. Reddy and S. M. Bhallamudi. "Gradually Varied Flow Computations in Cyclic Looped Channel Networks", *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 130, no. 5, pp. 424-431, 2004.
- [4] D. J. Sen and N. K. Garg. (2002). "Efficient Algorithm for Gradually Varied Flows in Channel Networks.", *J. Irrig. Drain. E.*, vol.128, no. 6, December, 2002.
- [5] Y. Saad. "Krylov Subspace Methods part II" in *Iterative Methods for Sparse Linear System*, 2nd Ed., SIAM, Philadelphia, PA, pp. 229-258, 2003.
- [6] C. F. Gerald. and Wheatley, P. O., "Solving Sets of Equations" in *Applied Numerical Analysis*, 4th Ed., Addison-Wesley Publishing Company, New York, NY, 1992.
- [7] B. Babaoğlu. "Application of BiConjugate Gradient Stabilized Method with Spectral Acceleration for Propagation over Terrain Profiles." M.S. Thesis, Bilkent University, Ankara, Turkey, 2003.
- [8] F. Santiago-Collazo and W. Silva-Araya. "Computation of Gradually Varied Flow in Channel Networks with Hydraulic Structures", *Jour. Irrig. Drain E.*, 145 (6); 2019.
- [9] G. W. Brunner. "HEC-RAS River System Analysis, V.5.0 User's Manual", US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, February 2016.