

ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA CAJA REPARTIDORA DE CAUDAL

J. Natividad Barrios Domínguez^a, Nahún H. García Villanueva^b, Efraín Aguilar Hernández^a, Carlos F. Bautista Capetillo^a y Julián González Trinidad^a

^aMaestría en Planeación de Recursos Hidráulicos, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde 801, Centro, Zacatecas, Zacatecas, México CP 98010, baucap@uaz.edu.mx

^bInstituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532 Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México CP 62550, nahung@tlaloc.imta.mx

Palabras Clave: Análisis numérico, caudal, compuertas deslizantes, operación, uso eficiente.

Resumen. El sistema de riego Santiago (Zacatecas, México) abastece sus necesidades hídricas de una fuente superficial, extrayendo el caudal en base a un programa previamente establecido. Debido a las características de la zona de riego, el agua que sale de la obra de toma se divide, dentro de una caja repartidora de caudal, a tres sistemas de conducción a superficie libre controlados por compuertas deslizantes.

El problema al que se enfrenta el operador del sistema, está relacionado con la abertura que debe tener cada una de estas estructuras para dejar pasar el caudal requerido aguas abajo, considerando que el nivel de la superficie libre del agua, respecto a un plano horizontal de referencia, es el mismo para las tres estructuras; sin embargo, por cuestiones topográficas, la carga hidráulica en cada una de ellas es diferente; además, las condiciones hidráulicas son distintas en cada red de conducción, generando valores del coeficiente de descarga diferentes para cada estructura.

Con el objetivo de solucionar esta problemática, se planteó un algoritmo numérico basado en iteraciones sucesivas para obtener la abertura de cada compuerta en función del caudal y la carga hidráulica para diferentes condiciones de demanda.

Los resultados obtenidos con el modelo, permiten estimar la abertura de las compuertas, en función del caudal de demanda y el nivel del agua propuesto en la caja repartidora respecto al plano horizontal de referencia con una variación de ± 3 por ciento. Con la ayuda del algoritmo, se construyeron gráficas que le permiten al operador establecer el criterio de abertura de las compuertas para distintas condiciones de caudal demandado por cada sistema de conducción. El gasto medido en campo al ser comparado con el calculado por el algoritmo numérico, muestra una variación de ± 5 por ciento.

El algoritmo numérico ha facilitado la operación del sistema, contribuyendo con esto a reducir los errores humanos en el manejo de las compuertas, incidiendo en el uso eficiente del agua.

1 INTRODUCCIÓN

En la agricultura, la aplicación del agua en tiempo y cantidad adecuadas juegan un papel fundamental en el rendimiento de los cultivos; sin embargo, en los últimos años la disponibilidad del agua para riego se ha reducido debido a la intensidad y duración de las sequías, teniendo como consecuencia una importante escasez de agua para el riego (Rosano-Méndez et. al. 2001). Tomando en cuenta que alrededor del 70% del agua extraída mundialmente con fines consuntivos es utilizada para el riego agrícola (FAO, 2003); aunado a lo anterior, se ha determinado que la eficiencia global del uso del agua en las zonas de riego en México es menor al 50% (CNA, 2006), de tal manera que la mitad del agua que sale de las fuentes de abastecimiento con fines agrícolas se pierde, ya sea en la red de conducción y distribución o por cualquier otro factor.

Debido a lo anterior, en la actualidad, se trabaja en la modernización de los sistemas de riego, partiendo de la premisa que establece que un proyecto de riego moderno es aquel que incorpora un proceso de técnicas y mejoras administrativas de los planes de riego combinada con reformas institucionales, con el objetivo de incrementar la eficiencia en la utilización del recurso (mano de obra, agua, economía y medio ambiente, entre otros) y el servicio de entrega del agua a los usuarios. Un diseño moderno de riego es el resultado de un proceso pensado que selecciona la configuración y los componentes físicos considerando un bien definido y realista plan de operación que se basa en el concepto de servicio. Un diseño moderno de riego no debe estar definido exclusivamente por componentes específicos y controles lógicos. Los conceptos más avanzados de la ingeniería hidráulica, ingeniería de riego, agronomía y ciencias sociales, deben ser usados para llegar a la más simple y factible solución que un proyecto de riego requiere (Burt, 1999).

Por otra parte, en México, la gran mayoría de los sistemas de conducción y distribución del agua para riego agrícola están formados por una red de canales con estructuras de control operadas manualmente, resaltando entre las principales, las compuertas deslizantes y radiales (García, 1998).

Considerando los conceptos anteriormente expuestos y con la finalidad de aprovechar los escurrimientos del Río Santiago, dentro del marco del uso eficiente del agua, al noroeste del estado de Zacatecas, México, en el año de 1998, la Comisión Nacional del Agua (CNA) concluyó la construcción de la presa Santiago con una capacidad útil de 6 millones de metros cúbicos, la cual satisface la demanda hídrica de una zona de riego de 600 hectáreas. El agua que suministra la fuente de abastecimiento del Sistema de Riego Santiago (SRS), es distribuida dentro de una caja repartidora de caudal, a tres sistemas de conducción a superficie libre denominados Canal Principal Margen Derecha (CPMD), Canal Principal Margen Izquierda (CPMI) y Canal Natural Río Santiago (CNRS). El caudal que circula a través de cada uno de estos sistemas de conducción, es controlado por compuertas deslizantes instaladas en la interfaz entre la caja repartidora y los canales.

Por las características propias de la distribución, el personal técnico del SRS se ha enfrentado a la problemática de cómo asignar los caudales a cada uno de los canales de conducción, considerando que la altura alcanzada por el agua respecto a un plano horizontal de referencia, dentro de la caja repartidora será igual para los tres canales; sin embargo, la demanda en cada caso es diferente y además, la geometría de las compuertas deslizantes que controlan el caudal también es distinta.

Debido a lo anterior, se desarrolló un algoritmo numérico basado en iteraciones sucesivas, con el objetivo de determinar la abertura que cada compuerta deslizante debe tener para dejar pasar el caudal demandado aguas abajo y con esto, dar solución al problema planteado.

2 ANTECEDENTES

Las compuertas, son estructuras que consisten en una placa móvil, plana o curva, las cuales son consideradas, desde el punto de vista hidráulico, como orificios de dimensiones variables por donde circula el agua y debido a estas variaciones, pueden controlar el caudal que pasa a través de éstas. Las compuertas, en la mayoría de los casos, se construyen entre las paredes laterales de un canal, de tal manera que el ancho de la compuerta es igual al ancho del canal, lo que origina un flujo bidimensional (Sotelo, 1991; Boiten, 2003).

En la teoría de los orificios, se presenta el caso de orificios de grandes dimensiones, o bien, de orificios sujetos a cargas hidráulicas pequeñas; en cualquiera de los dos casos, el caudal se calcula como (Azevedo y Álvarez, 1976):

$$Q = \frac{2}{3} C_d A \sqrt{2g} \frac{h_2^{3/2} - h_1^{3/2}}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

Donde:

Q es el caudal que circula a través del orificio [L^3T^{-1}].

C_d es el coeficiente de descarga que depende de h_2/a [Adimensional] (Naudascher, 2000).

a es la altura del orificio [L].

A es el área del orificio [L^2].

g es la aceleración de la gravedad [LT^{-2}].

h_1 y h_2 son las cargas hidráulicas medidas desde la superficie libre del agua, hasta la parte superior e inferior del orificio respectivamente [L].

2.1 Operación de Canales

En muchos sistemas de riego tradicional, los flujos son gobernados por la gravedad y la conducción del agua se realiza a través de canales, donde la distribución de las condiciones del flujo está influenciada por las estructuras hidráulicas. En la gran mayoría de los casos, la operación de estos sistemas se basa en estructuras operadas manualmente por técnicos empíricamente preparados, lo que origina un inadecuado manejo del agua en conducción y distribución y con esto, una de las principales causas de pérdidas. La operación de los canales con fines de riego agrícola, está basado en un sistema encargado de transferir el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los puntos de distribución y desvío, para finalmente hacer llegar el agua al usuario (Buyalski et al. 1991; García, 1998; Martínez-Austria, 1998).

Los métodos de operación de canales de riego determinan la variación del nivel del agua en cada tramo del canal con el fin de satisfacer la demanda hídrica de los cultivos. La evolución que presenta cada tramo, de acuerdo con la velocidad del flujo así como cambios en el caudal, es función del método de operación seleccionado. La operación de los canales de riego, involucra el manejo adecuado de los caudales y tirantes hidráulicos a lo largo de éste. Estas variables son independientes en la mayoría de las condiciones hidráulicas observadas en canales de riego. Según el método de operación utilizado, el tirante a lo largo de cada tramo del sistema se regula manteniendo el tirante constante en algún punto del tramo (Clemmens et al. 1997). La función principal de las compuertas como estructuras de control, es mantener constante el tirante de operación, considerando las variables de regulación, es decir, el caudal o la posición de la compuerta. El operador se enfrenta al problema de cómo mantener este tirante, el cual regularmente lo define de manera empírica, originando derivación de caudales distintos a los requeridos, provocando bajas eficiencias de operación.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización de la Zona de Riego Santiago

La zona de estudio se encuentra localizada dentro del ejido (tierra comunal) Miguel Auza, al noroeste del Estado de Zacatecas, México; con coordenadas geográficas $23^{\circ} 17' 52''$ de latitud norte $103^{\circ} 27' 36''$ longitud oeste y una altitud de 1,898 msnm. Se ubica dentro de la provincia fisiográfica denominada Meseta Central, subprovincia de Sierras y Llanos del Norte. El clima es templado y semiseco, con temperatura media de 18 grados centígrados, la precipitación media anual es de 414 mm (ver [Figura 1](#)).

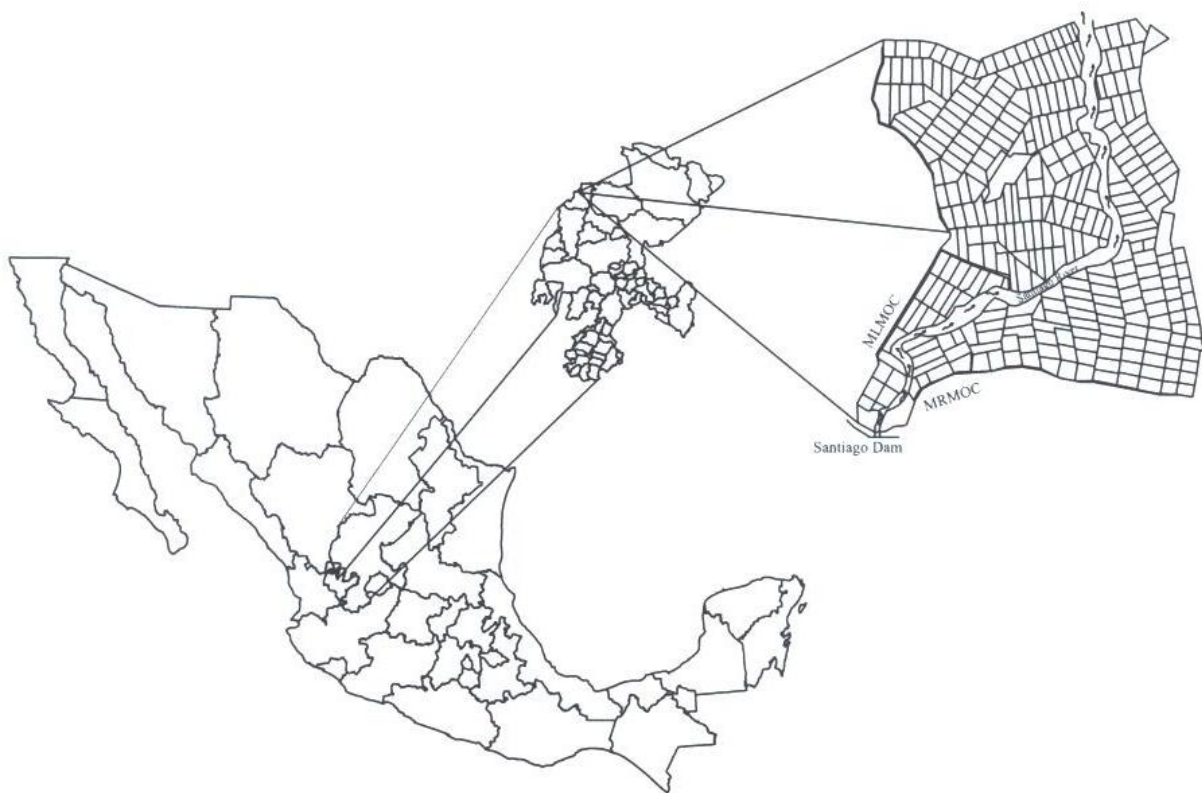


Figura 1: Localización del Sistema de Riego Santiago, Zacatecas, México

3.2 Características de la Caja Repartidora de Caudal

El agua de la presa Santiago, se extrae a través de la obra de toma, la cual consiste de un tubo a presión con una longitud de 60 metros en tubería de acero de 30 pulgadas de diámetro; el flujo es controlado por una válvula tipo mariposa, de operación manual con un gasto máximo de $3.37 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal que sale de la obra de toma, es entregado a un canal de 11.80 metros de longitud sobre el cual está instalado un vertedor con el objetivo de medir el flujo que se entrega en la caja repartidora.

La caja repartidora de caudal, está construida de concreto con un acabado liso; la sección transversal de ésta es de 1.75×2.60 metros con una longitud de 7.80 metros. Los canales principales, se conectan a la caja repartidora y en la interfaz entre la caja y los canales, se tienen instaladas las compuertas que regulan los caudales que circulan a través de cada uno de ellos (ver [Figura 2](#)).

Las características geométricas de las estructuras que regulan los flujos en el CPMD y en el CPMI son similares; tienen un ancho igual a 0.92 metros y alcanzan una abertura máxima de 0.90 metros; por otra parte, el ancho de la compuerta en el CNRS es de 1.22 metros y su abertura máxima alcanza los 0.90 metros (ver [Figura 2](#)). Estas dimensiones se ajustan a la sección transversal de la red principal de conducción, en el tramo de conexión entre la caja y los canales.

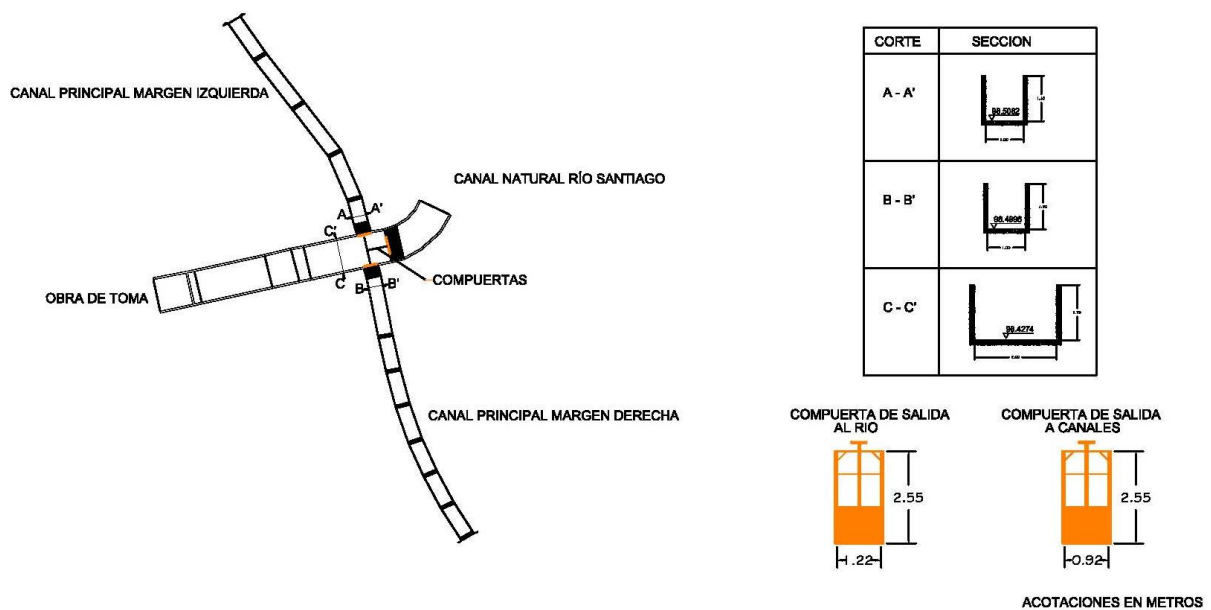


Figura 2: Representación Esquemática de la Caja Repartidora de Caudal

3.3 Algoritmo Numérico

El método empleado para determinar la abertura de cada una de las compuertas en función del caudal demandado por cada canal de conducción, está basado en proponer un nivel constante del agua dentro de la caja repartidora, es decir, un tirante constante aguas arriba de las compuertas, durante un intervalo de tiempo y con este valor, calcular la abertura de cada estructura. En la [Figura 3](#), se presentan las variables que intervienen en el análisis hidráulico, para posteriormente construir el algoritmo numérico que permite calcular los valores de las aberturas.

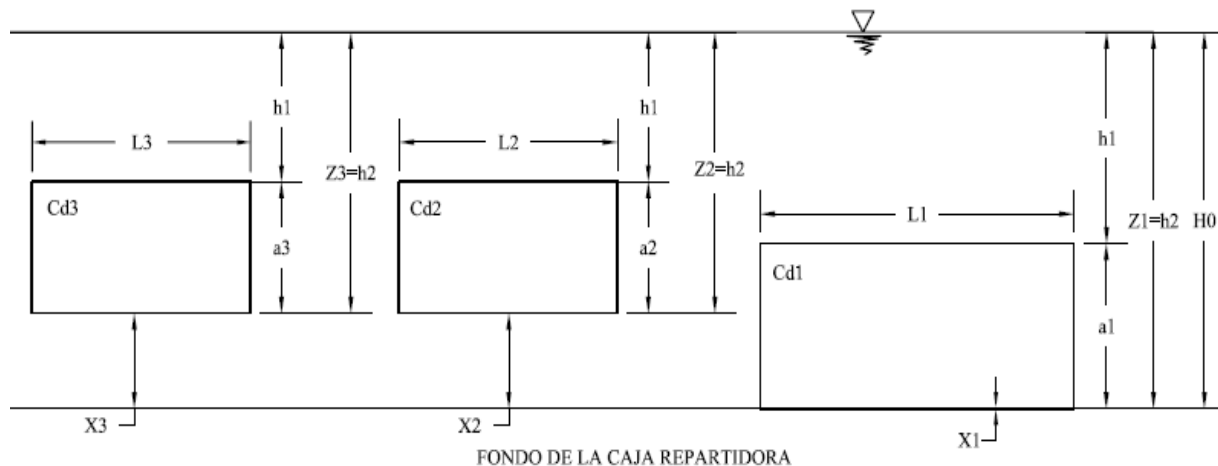


Figura 3: Declaración de Variables para la Construcción del Algoritmo Numérico

En la **Figura 3**, H_0 representa la carga hidráulica propuesta por el personal técnico operativo del sistema; X_1 , X_2 y X_3 son los desniveles topográficos medidos desde el fondo de la caja repartidora hasta la parte inferior del orificio de la compuerta; que en este caso, corresponden a la cota topográfica del fondo de los canales respectivos; Z_1 , Z_2 y Z_3 son valores que se calculan como: $Z_1=H_0-X_1$, $Z_2=H_0-X_2$ y $Z_3=H_0-X_3$. El ancho de cada una de las compuertas, está representada por L_1 , L_2 y L_3 ; los coeficientes de descarga, son indicados con Cd_1 , Cd_2 y Cd_3 y finalmente, la abertura para cada compuerta, calculadas en función de los términos anteriores, se representan con a_1 , a_2 y a_3 . Con la información anterior, se realizó un programa de cómputo en lenguaje Visual Basic 2005 Express de licencia libre (<http://msdn.microsoft.com/vstudio/express>) el cual permite estimar la abertura para cada una de las compuertas, resolviendo la Ecuación 1, a través de iteraciones sucesivas y mostrando los resultados en una hoja de Excel. La **Figura 4**, muestra el diagrama de flujo seguido para la elaboración del software.

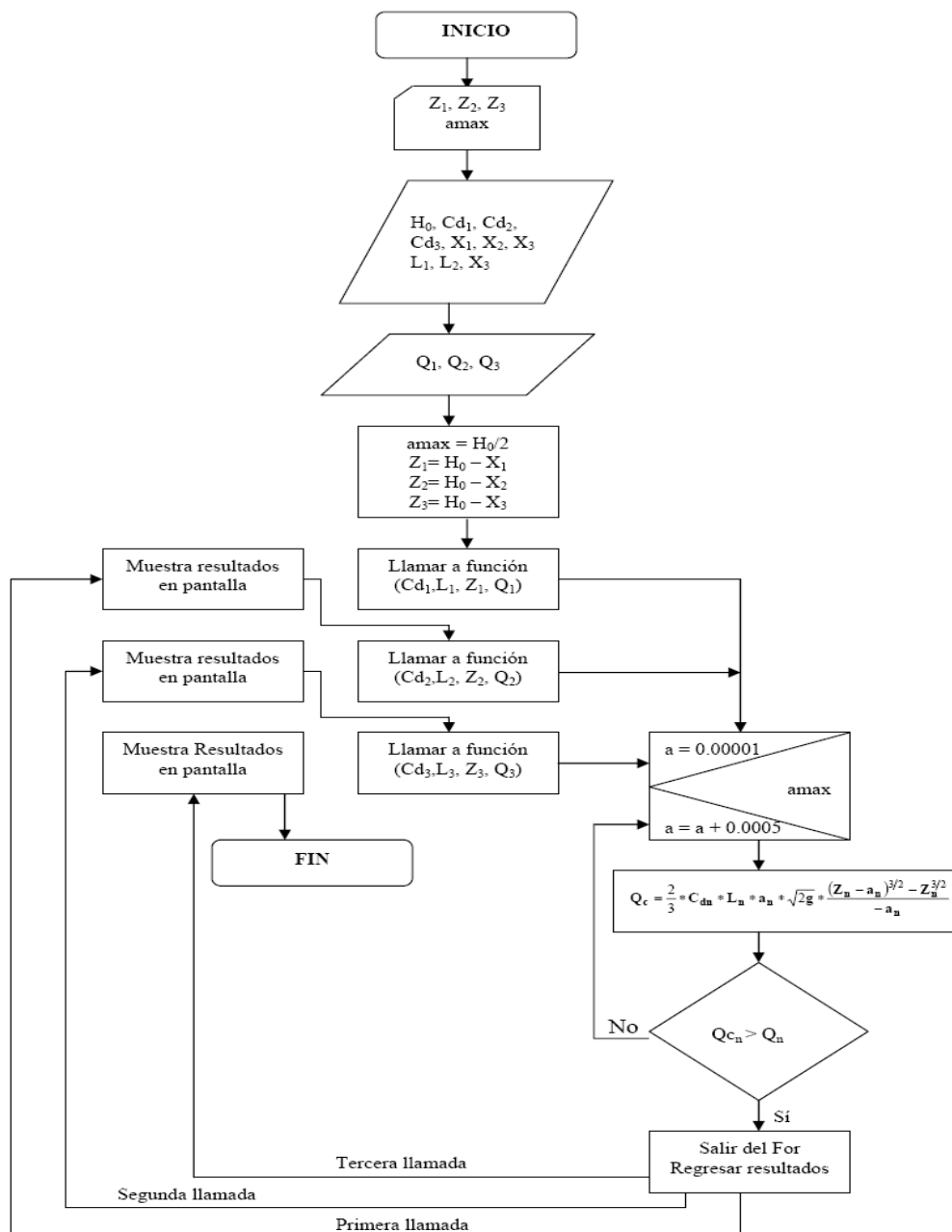


Figura 4: Diagrama de Flujo del Algoritmo Numérico.

4 RESULTADOS

El programa de cómputo desarrollado se utilizó para simular la demanda de agua, en los canales del Sistema de Riego Santiago. Las características geométricas y topográficas de la caja repartidora del SRS, se muestran en la [Tabla 1](#); los valores están relacionados con la nomenclatura indicada en la [Figura 3](#).

Compuerta	L_i (m)	X_i (m)	Cd_i (Adimensional)
1	1.22	0.00	0.56
2	0.92	0.07	0.53
3	0.92	0.07	0.53

Tabla 1: Condiciones Geométricas y Topográficas de la Caja Repartidora.

Por otro parte en la [Tabla 2](#), se muestran el caudal que demanda la red para satisfacer las necesidades hídricas de la zona de riego para dos periodos distintos.

Período	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	Q_3 (m ³ /s)	Q_{Total} (m ³ /s)	H_0 (m)
13/05/2006-18/05/2006	0.40	0.50	0.35	1.25	1.25
10/06/2006-15/06/2006	0.30	0.35	0.20	0.85	1.00

Tabla 2: Condiciones Hidráulicas para la Red de Conducción.

Con los valores mostrados en las Tablas 1 y 2, se simula la operación de la caja repartidora, para obtener las aberturas correspondientes a cada una de las compuertas para los dos períodos indicados en función de las condiciones establecidas. En la [Figura 5](#), se muestran los resultados obtenidos. Las aberturas calculadas con la ayuda del programa de cómputo, se llevaron al campo, con lo que se realizó un monitoreo, resultando una variación de ± 3 por ciento del nivel H_0 propuesto con respecto al real observado en campo.

Según se puede apreciar en la [Figura 5](#), las aberturas necesarias para dejar pasar el caudal demandado por cada canal, durante la semana del 13 al 18 de mayo de 2006, son: la abertura para la compuerta 1, de 8 cm, con un caudal calculado por el método de iteraciones sucesivas de 402 l/s; para el caso de la compuerta 2, la abertura es de 15 cm con un caudal calculado por el método de 501 l/s; en el caso de la compuerta 3, el caudal calculado por el método es de 351 l/s para una abertura de 10 cm. Un análisis similar se muestra en la [Figura 5](#) para la semana del 10 al 15 de junio de 2006. También se presentan, a través de la [Figura 6](#), la variación de la abertura de las compuertas en función de la carga hidráulica dentro de la caja repartidora de caudal. Estos valores corresponden al caudal demandado por los sistemas de conducción para la semana del 13 al 18 de mayo de 2006.

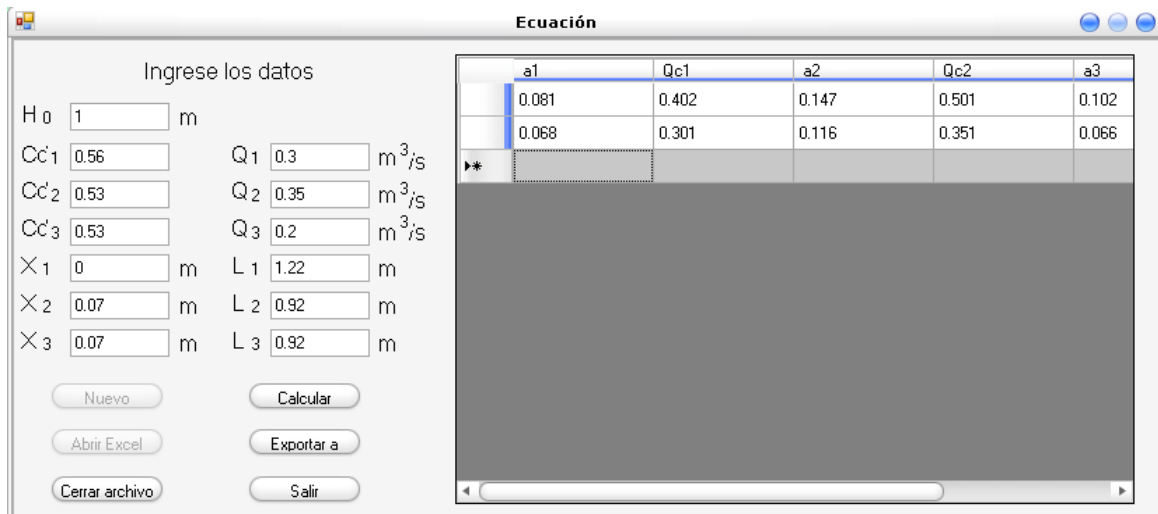


Figura 5: Programa de Cómputo para el Cálculo de las Aberturas

En la [Figura 6](#), está representado un caso típico de la demanda de agua en el Sistema de Riego Santiago; este tipo de gráficas han sido implementadas en el SRS con la finalidad de facilitar, al personal técnico que opera el sistema, el manejo de las compuertas en la caja repartidora de caudal. De la misma manera, se han desarrollado una serie de gráficas para diferentes condiciones de caudal demandado por cada canal; en la [Figura 7](#), se presenta la relación entre el caudal y la abertura de las compuertas, considerando un valor de 1.25 m de carga hidráulica dentro de la caja repartidora; sin embargo, el personal técnico cuenta con el programa de cómputo mostrado en este trabajo para ser utilizado en casos particulares y que no se han graficado.

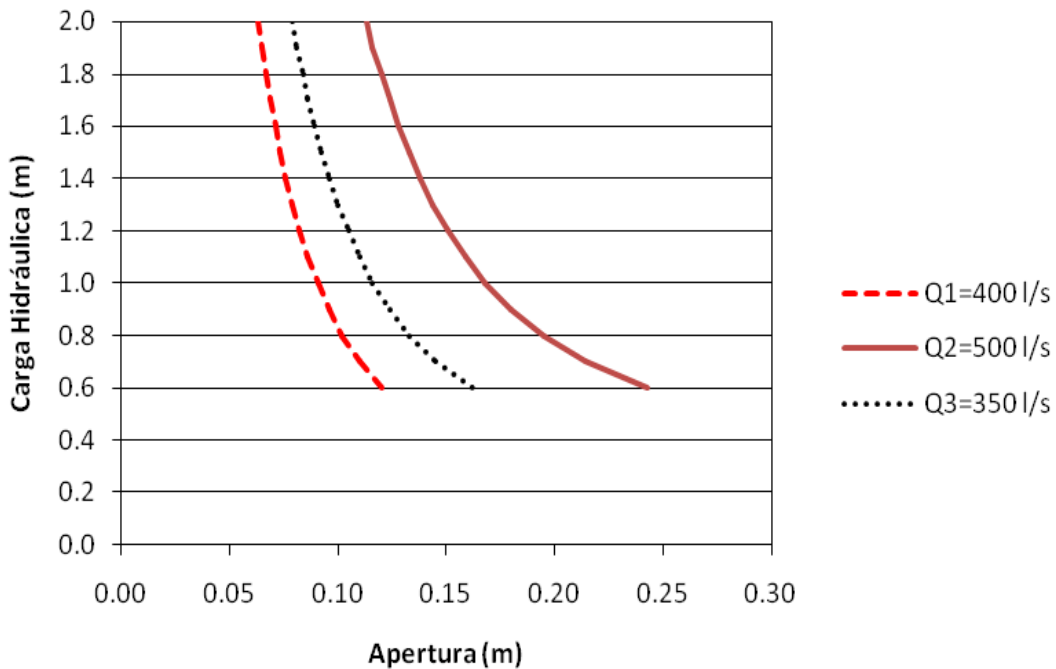


Figura 6: Abertura para las Tres Compuertas en Función de la Carga Hidráulica

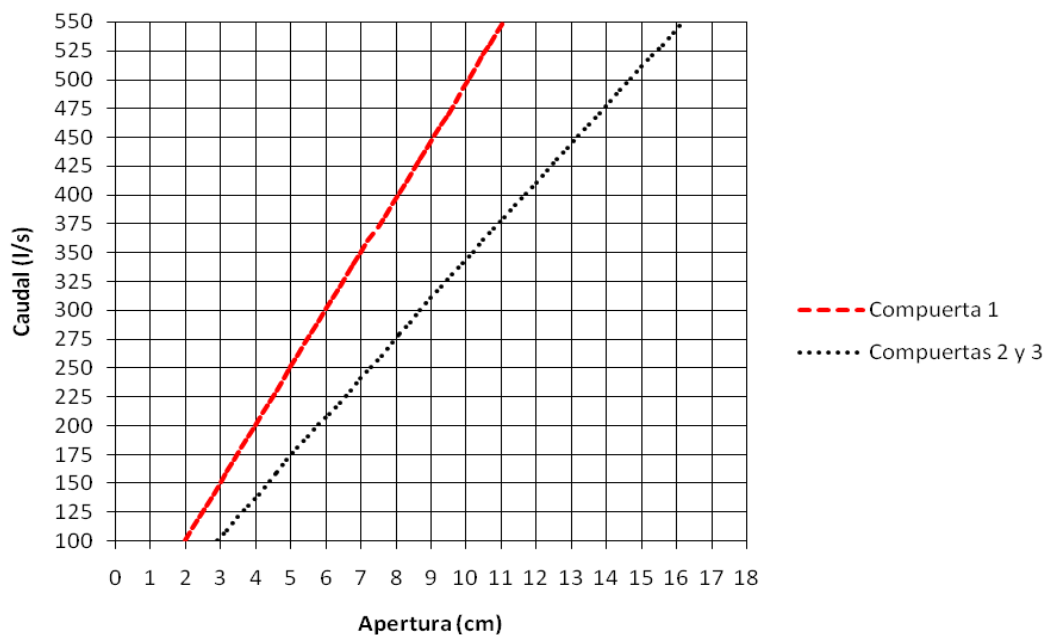


Figura 7: Relación Carga-Abertura para $H_0 = 1.25$ m

El modelo mostrado en la [Figura 7](#), ha sido utilizado por el personal técnico encargado de la operación del SRS; para validar dicho modelo, se llevaron a cabo aforos, encontrando una variabilidad del orden de ± 5 por ciento entre los valores del caudal estimado y los reales medidos en campo. Además, se ha podido observar que con la ayuda del programa de cómputo y las gráficas, los operadores pueden manejar con mayor eficiencia el agua que sale de la fuente de abastecimiento ya que con anterioridad, conocen las maniobras que se requiere hacer en las compuertas para que estas tengan la abertura necesaria para suministrar la cantidad adecuada de agua a cada sistema de conducción.

5 CONCLUSIONES

La operación de las compuertas en la caja repartidora, es parte de un proyecto integral de modernización que se ha implementado desde al año 2000. El modelo desarrollado para la distribución del agua en la caja repartidora ha permitido ahorrar cantidades importantes de agua, ayudando con ello a la sustentabilidad del recurso hídrico en el SRS. El personal técnico responsable de la operación del sistema cuenta con una herramienta para calcular en tiempo real la abertura de las compuertas en función de la cantidad de agua que demanda la zona de riego. La implementación de esta metodología ha ayudado a definir de manera sencilla la mejor alternativa en la operación de la caja repartidora de caudal del SRS, permitiendo con esto, incrementar la productividad del agua.

REFERENCIAS

- J. M. Azevedo y G. Álvarez. *Manual de hidráulica*. Editorial Harla, 1976.
- W. Boiten. *Hydrometry*. IHE Delft Lecture Note Series, Balkema/Brookfield, 2003.
- C. Burt. Current canal modernization from an international perspective. *Irrigation Training and Research Center*, California Polytechnic State University, USA, 1999.
- C. P. Buyalski, D. Ehler, H. Falvey, D. C. Rogers y E. A. Serfozo. *Canal systems automation manual*, volume 1. Bureau of Reclamation, Department of the Interior, USA, 1991.

- A. J. Clemmens, B. De León M., V. M. Ruíz C. y M. Iñiguez C. *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*, capítulo 4. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1997.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2006.
- FAO (Food and Agricultural Organization). *Irrigation water*. Rome, Italy, 2003.
- N. H. García V. *Estructuras fluídicas para la automatización de canales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1998.
- P. Martínez-Austria. *Uso eficiente del agua en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1998.
- E. Naudascher. *Hidráulica de canales*. Limusa, 2000.
- L. Rosano-Méndez, P. L. Rendón, H. P. Pacheco, B. J. Etchevers, M. J. Chávez y H. H. Vaquera. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia* 35:577-588, 2001.
- G. Sotelo A. *Hidráulica General*, volumen I. Limusa, 1991.