

# REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA DE PRESAS DEL DISTRITO DE RIEGO 005 DELICIAS, CHIHUAHUA, MÉXICO

## OPERATING RULES FOR THE RESERVOIR SYSTEM OF THE IRRIGATION DISTRICT 005 DELICIAS, CHIHUAHUA, MEXICO

David Ortega-Gaucin

Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Ave. Alianza Norte Núm. 306, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, Apodaca, Nuevo León, C.P. 66600, MÉXICO.

### RESUMEN

Se presenta el análisis de las políticas de extracción de agua y se determinan reglas de operación del sistema de presas de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero, principales fuentes de abastecimiento de agua del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua, México. Para ello, se aplican técnicas de correlación estadística y se plantean modelos de programación lineal. El análisis estadístico de las extracciones históricas de agua en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola, revela que en la práctica no se está aplicando una política racional de manejo del sistema, por lo que las reglas de operación propuestas están orientadas a subsanar esta deficiencia. Para validar las reglas de operación se aplican modelos de simulación del funcionamiento del sistema. Los modelos muestran que además de incrementarse la eficiencia en el uso del agua, se mantienen de manera más uniforme los niveles de volúmenes almacenados en las presas. De este modo, es factible regar aproximadamente la misma superficie año con año, lo cual contribuye a reducir los derrames y evitar déficits hídricos, y a su vez redundante en mantener una economía más estable en la región.

**Palabras clave adicionales:** Sequía, déficit hídrico, presa de almacenamiento, distrito de riego, gestión del agua.

### ABSTRACT

Water extraction policies and operating rules for La Boquilla and Francisco I. Madero reservoirs system are analyzed and validated. Both reservoirs constitute the main water supply sources for the Irrigation District 005 Delicias, Chihuahua, Mexico. Statistical correlation, linear programming and simulation models of the reservoir operation are applied to define policies and to validate operating rules. The water extraction statistical analysis reveals that, in fact, a rational management system policy, according to the water storage volume at the beginning of the agricultural year, is not being applied; thus the proposed rules are aimed at overcoming this deficiency. Reservoir operation simulation models are applied to validate the rules. The models results show that water use efficiency increases apart from keeping steady water storage levels. Thereby, it is feasible to irrigate each year the same land surface area, decrease spills and prevent water shortage, which enables a steady economy in the region.

**Additional keywords:** Drought, water shortage, irrigation district, water management.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios en la cuenca del río Conchos y particularmente en el Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua, con la finalidad de analizar la situación de los recursos hídricos y la gestión que se hace del agua ante la ocurrencia de periodos de sequía cada vez más severos y prolongados (Kelly, 2001; Bergaoui y Alouini, 2001; Fournier, 2001; Velasco, 2002; Ortega-Gaucin *et al.*, 2009; Ortega-Gaucin, 2012). Con base en las investigaciones citadas, es factible afirmar que los impactos causados por el déficit hídrico en la cuenca y

específicamente en el distrito 005, deben modificar la visión y los criterios de planeación operativa y de desarrollo económico del mismo, si bien es cierto que es difícil predecir años o periodos de escasez o abundancia de agua, sólo de esa manera se estará en condiciones de mitigar los impactos y disminuir la vulnerabilidad de los productores ante esos eventos extremos. El elevado déficit hídrico en cada periodo de sequía, y la frecuencia con que éstos se presentan, son factores limitantes que requieren atención tanto de los administradores y operadores del agua como de los usuarios. Es importante que las directrices sobre el manejo del

recurso se basen en la probabilidad de menor disponibilidad y no en condiciones de aparente abundancia. Por ello, es conveniente revisar la forma en que se ha operado el sistema y las posibilidades de mejorar el proceso, de tal manera que la demanda de agua se adapte a la oferta y no a la inversa, aplicando en la práctica una política de extracción en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola. Sólo de esa manera se estará en condiciones de paliar los efectos de los eventos extremos y así auxiliar en la reducción de sus impactos y disminuir la vulnerabilidad de los productores ante estos fenómenos.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar las políticas de extracción de agua de las presas de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero (Las Vírgenes), las cuales constituyen las principales fuentes de abastecimiento de agua superficial del distrito 005, y proponer reglas de operación que permitan normar el criterio de los operadores en la toma de decisiones para mejorar la eficiencia del uso del agua y disminuir, hasta donde sea posible, las afectaciones en la economía de la región, sobre todo cuando existe escasez de agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Distrito de Riego 005 Delicias se localiza en la zona centro-sur del estado de Chihuahua, dentro de la cuenca del río Conchos, y tiene una superficie regable total de 80,102 ha con 9,657 usuarios registrados con derecho de riego (Figura 1). Las fuentes de abastecimiento de agua del distrito son las presas La Boquilla y Francisco I. Madero (Cuadro 1), así como 850 pozos profundos de los cuales se extraen anualmente 250 hm<sup>3</sup> de agua para riego.

## Métodos

En los últimos años se han hecho importantes avances en el desarrollo de una amplia gama de herramientas para ayudar en la planificación y gestión de sistemas complejos de recursos hidráulicos (McCartney, 2007). Numerosos investigadores han desarrollado modelos matemáticos para la gestión y el funcionamiento de embalses y sistemas fluviales (por ejemplo, Simonovic y Savic, 1989; Jolma, 1994; DeGagne *et al.*, 1996; Koutsoyiannis *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012). Asimismo, los modelos de simulación para la operación de los embalses se han aplicado desde hace muchos años (por ejemplo, Emery y Meek, 1960; Hall y Dracup, 1970; Biswas, 1976; Stansbury *et al.*, 1991; Huang y Yang 1999; Ito *et al.*, 2001; Thorne *et al.*, 2003). Varios modelos son personalizados para un sistema en particular, sin embargo, existen otros como el descrito por Palacios (1989) que pueden aplicarse a cualquier sistema o presa de almacenamiento. Precisamente este último modelo – en conjunto con otras técnicas estadísticas – es el que se utiliza en el presente estudio para definir reglas de operación de las presas de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero, para lo cual se aplicaron las siguientes fases de investigación (mismas que posteriormente se describen en detalle): 1) análisis de las políticas actuales de extracción de agua de las presas; 2) determinación de las reglas de operación del sistema; y 3) validación de las reglas definidas, mediante la simulación del funcionamiento de los vasos de almacenamiento.

**1. Análisis de las políticas de extracción de agua.** Para verificar si en la práctica se está aplicando una política racional de extracción de agua de las presas en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola (1° de octubre), se siguió el procedimiento propuesto por Acosta y Castañeda (1991): se correlacionaron los valores históricos de los almacenamientos observados al 1° de octubre con las extracciones anuales de las presas correspondientes al periodo de registro que cada una de ellas tiene (1936-2004 y 1950-2004, respectivamente).

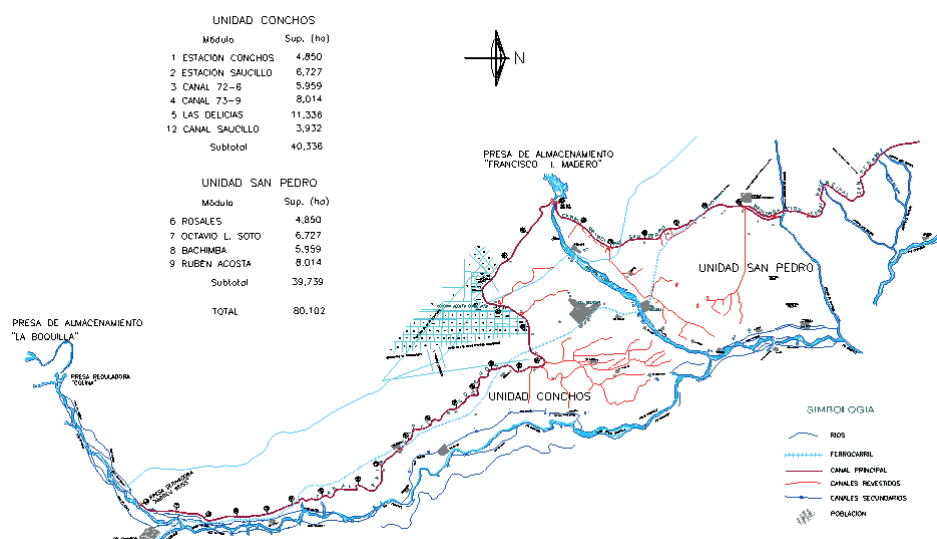


FIGURA 1. Plano general del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua.

**CUADRO 1. Capacidades, aportaciones y extracciones medias de las presas de almacenamiento del distrito de riego 005 Delicias, Chih.**

Presa	Río que la abastece	Capacidad de la presa <sup>a</sup> (hm <sup>3</sup> )	Aportación media de agua (hm <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> )	Extracción media de agua (hm <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> )
La Boquilla	Conchos	2,903.4	1,156.0	851.4
Francisco I. Madero	San Pedro	348.0	361.0	216.1

<sup>a</sup>Nivel de aguas máximas ordinario (NAMO).

**2. Determinación de las reglas de operación de las presas de almacenamiento.** En términos generales, la metodología para determinar las reglas de operación de las presas de almacenamiento analizadas se describe a continuación:

**Determinación del volumen de agua que puede garantizarse anualmente a los usuarios.** Para determinar el volumen de extracción constante que puede ser garantizado a los usuarios, sujeto a las restricciones de una capacidad fija de los vasos de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero y con base en los volúmenes de aportaciones anuales esperados, se utilizó un modelo de programación lineal similar al descrito por Palacios (1989), el cual tiene la estructura siguiente:

**Función objetivo:** Maximizar el beneficio económico ( $B$ ) que resulta de multiplicar el valor del beneficio medio ( $Bm$ ) que se obtiene por metro cúbico que entra a la presa por el volumen de agua que se puede garantizar ( $X$ ), menos la pérdida por unidad de volumen no servido ( $Pv$ ) por la suma del valor de la probabilidad ( $P_i$ ) de entrada del volumen  $V_i$ , por el volumen esperado con probabilidad  $i$  ( $V_i$ ), para todo el número ( $n$ ) de intervalos de clase ( $i$ ); lo que se expresa en la función objetivo siguiente:

$$\text{Max } B = Bm \cdot X - P \sum_{i=1}^n P_i V_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

#### Restricciones:

- Evitar déficit de agua, para lo cual debe cumplirse que el volumen esperado con probabilidad  $i$  ( $V_i$ ) debe ser mayor o igual que el volumen anual que se puede garantizar ( $X$ ) menos el volumen extraído del vaso ( $Y_i$ ):

$$V_i \geq X - Y_i \quad V_i \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

- Media, es decir, el promedio del volumen extraído ( $P_i Y_i$ ) debe ser menor o igual al promedio de aportaciones ( $P_i V_i$ ):

$$\sum_{i=1}^n P_i Y_i \leq \sum_{i=1}^n P_i V_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

- Evitar derrames, para lo cual es necesario que el volumen esperado con probabilidad  $i$  ( $V_i$ ) más el almacenamiento al inicio del año hidrológico ( $S$ ) menos el volumen extraído del vaso ( $Y_i$ ), sea menor o igual que la capacidad de almacenamiento del vaso ( $CV$ ):

$$V_i + S - Y_i \leq CV \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

- Extracción de agua, la extracción de volumen anual ( $Y$ ) no debe ser mayor que la suma del almacenamiento al inicio del año hidrológico ( $S$ ) más el volumen esperado con probabilidad  $i$  ( $V_i$ ), para evitar secar el vaso:

$$Y_i \leq S + V_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

El modelo se resolvió utilizando el módulo *Solver* del sistema de cómputo *Microsoft Office Excel*® 2007, el cual permite resolver problemas de programación lineal utilizando el método simplex modificado. A partir de los resultados del modelo, además de definir un volumen medio a garantizar a los usuarios, se obtuvo el volumen mínimo almacenado en las presas para el inicio del año hidrológico que comienza el 1° de julio con la temporada de lluvias.

**Curvas de control de volúmenes máximos y mínimos mensuales.** Posteriormente, dado que con los resultados del modelo de programación lineal sólo se estimó la disponibilidad total anual de agua, fue necesario hacer un ajuste tomando en cuenta la variabilidad de la demanda mensual, la cual generalmente está desfasada respecto a las entradas mensuales a los vasos y que no siempre pueden regularse en su totalidad. Para este ajuste se calcularon unas curvas que indican, para cada mes, el riesgo de llegar a secar los vasos o de que las presas lleguen a derramar. Estas curvas se calcularon para diferentes patrones de demanda de agua con el método propuesto por Palacios (1989), bajo el supuesto de que las entradas a los vasos tienen una distribución estadística Log-Normal. El método es el siguiente:

**a) Curva de control de volúmenes máximos.** Con objeto de evitar derrames en cualquier mes del año, se debe cumplir que el volumen almacenado en el mes  $j$  ( $A_j$ ) debe ser igual a la suma del volumen de demanda acumulada al mes ( $C_j$ ) menos el volumen almacenado en la presa al principio del mes ( $I_j$ ) más la capacidad de almacenamiento del vaso ( $CV$ ); dicha sumatoria a su vez debe ser mayor o igual que el volumen de las entradas acumuladas del mes ( $Z_j$ ), para todos los meses ( $j$ ); tal como se indica en siguiente relación:

$$A_j = C_j - I_j + CV \geq Z_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (6)$$

Asumiendo que los valores de entradas acumuladas,  $Z_j$  se distribuyen como una función de probabilidades Log-Normal, con una media aritmética de los logaritmos de las entradas acumuladas  $M_j$ , y una desviación estándar de los logaritmos de dichos valores,  $\sigma(\ln Z_j)$ , los derrames ocurrirán con una probabilidad ( $a$ ), si:

$$Z_j = A_j = \text{Exp}[M_j + \alpha(a)\sigma(\ln Z_j)] \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (7)$$

Y el volumen máximo que debe tener el vaso al inicio de un mes  $j$  ( $I_j$ ), para evitar el derrame con una cierta probabilidad ( $a$ ), debe ser igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de la presa ( $CV$ ) más el volumen de demanda acumulada al mes ( $C_j$ ) menos el volumen almacenado en el mes ( $A_j$ ); tal como se indica:

$$I_j = CV + C_j - A_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (8)$$

**b) Curva de control de volúmenes mínimos.** La demanda acumulada de agua para el mes  $j$  ( $C_j$ ) puede expresarse como la suma del volumen máximo del vaso al inicio del mes ( $I_j$ ) más las entradas acumuladas del mes ( $Z_j$ ):

$$C_j = I_j + Z_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (9)$$

O bien, se puede definir un volumen  $B_j$  para el mes  $j$ , que debe ser igual a la diferencia de la demanda de agua acumulada para el mes ( $C_j$ ) menos el volumen máximo del vaso al inicio del mes ( $I_j$ ), el cual a su vez debe ser menor o igual que el volumen de entradas acumuladas del mes ( $Z_j$ ):

$$B_j = C_j - I_j \leq Z_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (10)$$

Para una probabilidad ( $a$ ) de que llegue a secarse el vaso:

$$B_j = \text{Exp}[M_j - \alpha(a)\sigma(\ln Z_j)] \quad (11)$$

La expresión final para calcular los volúmenes mínimos es:

$$I_j = C_j - B_j + LM \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (12)$$

Puesto que el volumen máximo del vaso al inicio del mes ( $I_j$ ) en esta ecuación puede llegar a adquirir un valor negativo y su valor mínimo, cuando más, debe ser el almacenamiento mínimo de la presa ( $Vd$ ), se hace un ajuste a dicha ecuación, adicionándole el valor  $LM$ , tal que:

$$LM = (\max \text{ neg } I_j) + Vd \quad (13)$$

Con la información obtenida fue posible formular las reglas para mejorar la operación de las presas de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero.

**3. Modelos de simulación.** Con base en las reglas de operación obtenidas y con el propósito de probar la bondad de las mismas, se desarrolló un modelo de simulación para cada presa de almacenamiento, comparando los resultados obtenidos con los reales observados. Los modelos de simulación se basan en el principio de balance de masas, siendo las expresiones matemáticas las siguientes:

**Modelo de simulación de la presa La Boquilla.** El volumen almacenado en la presa al final del mes  $j$  ( $VAB_{j+1}$ ) debe ser igual a: el volumen almacenado al principio del mes 1 ( $VAB_1$ ) que corresponde al inicio de año agrícola (1° de octubre), menos las aportaciones por cuenca propia del mes  $j$  ( $AB_j$ ), menos la evaporación neta del vaso en el mes ( $ENB_j$ ), menos las extracciones para riego del mes ( $ERB_j$ ), menos las extracciones para uso doméstico del mes ( $EUD_j$ ), menos las extracciones para las unidades de riego "Labores Viejas" en el mes ( $ELV_j$ ), menos los derrames de la presa en el mes ( $DEB_j$ ):

$$VAB_{j+1} = VAB_1 + \sum_{j=1}^{12} AB_j - \sum_{j=1}^{12} ENB_j - \sum_{j=1}^{12} ERB_j - \sum_{j=1}^{12} EUD_j - \sum_{j=1}^{12} ELV_j - \sum_{j=1}^{12} DEB_j \quad (14)$$

**Modelo de simulación de la presa Francisco I. Madero.**

El volumen almacenado en la presa al final del mes  $j$  ( $VAF_{j+1}$ ) debe ser igual a: el volumen almacenado al principio del mes 1 ( $VAF_1$ ) que corresponde al inicio de año agrícola (1° de octubre), menos las aportaciones por cuenca propia del mes  $j$  ( $AF_j$ ), menos la evaporación neta del vaso en el mes ( $ENF_j$ ), menos las extracciones para riego del mes ( $ERF_j$ ), menos los derrames de la presa en el mes ( $DEF_j$ ):

$$VAF_{j+1} = VAF_1 + \sum_{j=1}^{12} AF_j - \sum_{j=1}^{12} ENF_j - \sum_{j=1}^{12} ERF_j - \sum_{j=1}^{12} DEF_j \quad (15)$$

Los modelos de simulación de corrieron en el sistema de cómputo *Microsoft Office Excel® 2007*. La simulación de ambas presas de almacenamiento se realizó utilizando las aportaciones reales y las evaporaciones netas reales para los años agrícolas 1989-90 al 2003-04, y utilizando los beneficios netos ajustados a precios constantes del año agrícola 1993-94. Además, los almacenamientos al final de un año agrícola se utilizaron como almacenamientos iniciales del siguiente año para darle continuidad a la simulación.

**Eficiencia en el uso del agua en los vasos de almacenamiento.** El objetivo de obtener reglas de operación de las presas de almacenamiento es mejorar la eficiencia del uso del agua en los vasos ( $Eu$ ), definiendo esta eficiencia como la relación entre el volumen medio anual de agua extraída para su utilización ( $Ex$ ) y el volumen que en promedio recibe el vaso ( $VA$ ), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Eu = \frac{Ex}{VA} \quad (16)$$

Aunque esta definición no toma en cuenta el aspecto económico, se infiere que al aumentar esta eficiencia, más agua estará disponible para riego con un consecuente incremento en los beneficios para los usuarios del distrito; además, la reducción en derrames significa también una reducción en los daños como consecuencia de las inundaciones en la parte baja del distrito y en las poblaciones aledañas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Políticas actuales de extracción de agua

Para verificar si en la operación de las presas de almacenamiento se está aplicando en la práctica alguna política de extracción de agua, se relacionaron gráficamente los volúmenes extraídos en función de los almacenamientos registrados al inicio del año agrícola (1° de octubre). Con respecto a la presa La Boquilla, en la Figura 2 se presenta la gráfica correspondiente. Sobre cada punto de esta figura, se anota el año (con dos dígitos) al cual se refiere la pareja de valores que corresponden al punto indicado. De la observación de estos puntos, se infiere que no se ha seguido una política de extracción ya que, por ejemplo, para un mismo almacenamiento se han extraído diferentes volúmenes de agua. Sin embargo, dentro de la variabilidad que exhiben los puntos de la gráfica, se pueden visualizar dos tendencias de políticas de operación: la “conservadora”, indicada con línea punteada y que corresponde a las extracciones menores para cada volumen disponible en la presa, y la “ambiciosa”, indicada con línea continua, siguiendo los puntos de mayor extracción, en función de los volúmenes alcanzados cada 1° de octubre. Como se puede observar, la política ambiciosa se comenzó a aplicar a finales de los 80's y principios de los 90's.

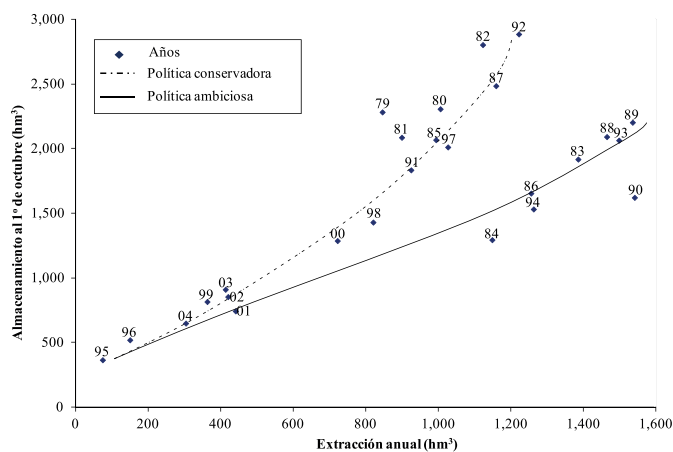


FIGURA 2. Relación almacenamientos al 1° de octubre–extracciones anuales de la presa La Boquilla.

Para el caso de la presa Francisco I. Madero, en la Figura 3 se puede observar que, a diferencia de la presa La Boquilla, la relación entre los almacenamientos y las extracciones presentan una tendencia más uniforme, ajustándose bien a un modelo de correlación lineal ( $r^2 = 0.80$ ), por lo cual se infiere que, en general, se tienen menos dificultades al momento de programar la extracción de agua en función de los volúmenes almacenados al 1° de octubre, lo cual se explica porque esta presa de almacenamiento tiene una capacidad mucho menor en relación con la presa La Boquilla.

Por lo tanto, se puede afirmar que durante el período 1984-2004 en ambas presas de almacenamiento se presentó una extracción variable, no planeada y que dependió en gran medida de la demanda propuesta por los propios usuarios del distrito. En las Figuras 4 y 5 se observa cómo las extracciones de las

presas La Boquilla y Francisco I. Madero en los años 1992 a 1994 fueron mayores que los escurrimientos aportados por sus respectivas cuencas, provocando que el volumen almacenado y disponible para 1995 fuera mínimo, de tal manera que las presas no se abrieron al riego en ese año por no alcanzar los niveles mínimos de operación.

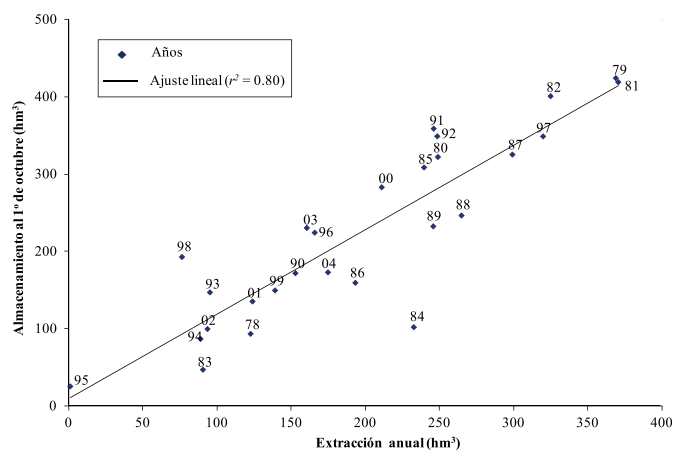


FIGURA 3. Relación almacenamientos al 1° de octubre–extracciones anuales de la presa Francisco I. Madero.

La experiencia del año de 1995, en el cual no se abrieron las presas para el riego con todas sus implicaciones económicas y sociales, propició que los usuarios desistieran de exigir volúmenes imposibles (años 1994 y 1995) para cubrir la demanda a la cual estaban acostumbrados (1,100 a 1,400  $\text{hm}^3$  anuales). Sin embargo, en los años 1997, 1998 y 2000 se volvió a incurrir en los mismos errores que en el pasado y se extrajeron volúmenes mayores que los escurridos. A partir de ese año la política de operación ha sido la de extraer aproximadamente la misma cantidad de agua que entra a las presas.

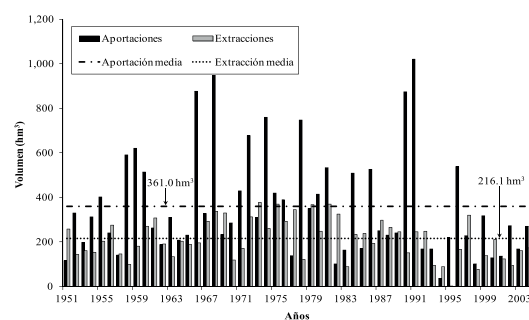


FIGURA 4. Aportaciones históricas observadas y extracciones realizadas de la presa La Boquilla.

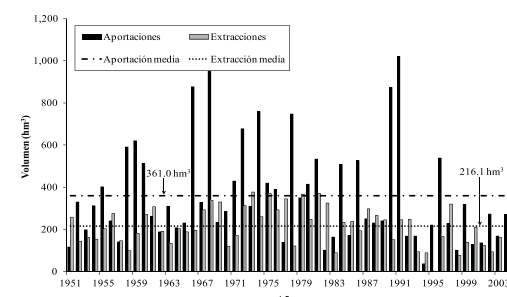


FIGURA 5. Aportaciones históricas observadas y extracciones realizadas de la presa Francisco I. Madero.

### Definición de las reglas de operación para las presas de almacenamiento

A partir de los resultados obtenidos en la solución de los modelos de programación lineal planteados en el apartado de métodos, es posible formular las siguientes reglas de operación de los vasos de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero:

**Extracción media anual.** La extracción total media anual de las presas analizadas, incluyendo las pérdidas por evaporación de los vasos, para maximizar el ingreso de los productores, deberá ser de 1,156 y 361 hm<sup>3</sup> al año, respectivamente. Sin embargo, se recomienda que las extracciones de agua (incluyendo pérdidas por evaporación) sean menores o cuando más iguales a dichos valores, para lo cual hay que tomar en consideración las siguientes reglas.

**Almacenamiento al inicio del año agrícola.** Con la finalidad de tener un criterio más amplio en la toma de decisiones, se calcularon las curvas de control de niveles de las presas considerando diferentes probabilidades (95, 90, 85, 80 y 75%) de no derramar y de no secar los vasos y para diferentes demandas anuales que incluyen las salidas por evaporación; los patrones de demanda de agua fueron obtenidos mediante un modelo de optimización desarrollado por Ortega-Gaucin *et al.* (2009). Así, para el caso de la presa La Boquilla, las demandas anuales consideradas fueron las siguientes: 722, 840, 935, 1009 y 1154 hm<sup>3</sup>, y las curvas resultantes se presentan en la Figura 6. Asimismo, se calcularon las curvas correspondientes para la presa Francisco I. Madero considerando demandas anuales de 150, 185, 225, 300 y 358 hm<sup>3</sup>, las cuales se pueden observar en la Figura 7.

Por lo tanto, tomando en cuenta las curvas de las Figuras 6 y 7, con el propósito de minimizar el riesgo de derramar o de llegar a secar los vasos de almacenamiento, el nivel de operación de las presas al inicio del año agrícola debe ser el establecido por las curvas de control descritas anteriormente, de acuerdo con la demanda y la probabilidad seleccionadas. Si el almacenamiento no está dentro del rango, deberá hacerse un ajuste en el programa de extracciones tal como se describe a continuación:

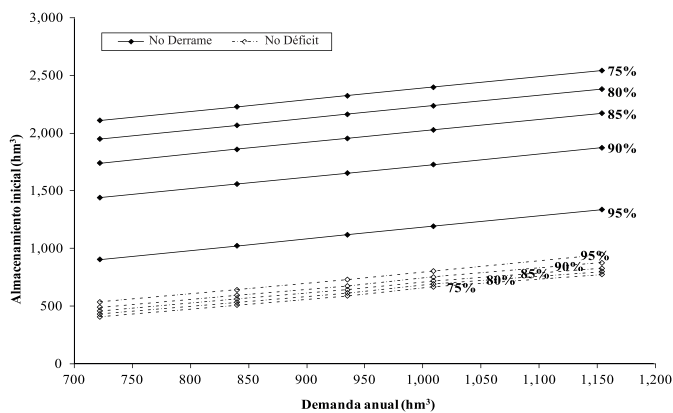


FIGURA 6. Almacenamiento recomendable a diferentes niveles de probabilidad al inicio del año agrícola en la presa La Boquilla.

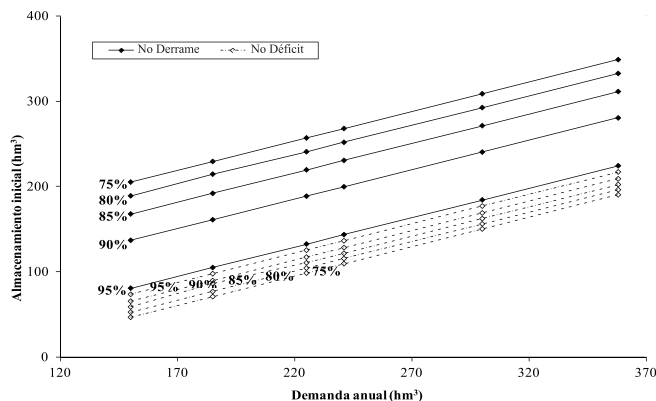


FIGURA 7. Almacenamiento recomendable a diferentes niveles de probabilidad al inicio del año agrícola en la presa Francisco I. Madero.

Si el almacenamiento es menor del nivel que indica la curva de no déficit, deberá reducirse la extracción objetivo (propuesta en la primera regla) una proporción igual a la relación que existe entre el volumen de extracción de octubre y el volumen de la curva de no déficit ( $V_{oct}/V_{def}$ ).

Si el almacenamiento es mayor del nivel que indica la curva de no derrame, el ajuste deberá hacerse aumentando la extracción objetivo una proporción igual a la relación que existe entre el volumen de octubre y el volumen que indica la curva de no derrame ( $V_{oct}/V_{derr}$ ).

#### Ajuste del almacenamiento al inicio del año hidrológico.

El punto clave en la solución de los modelos de programación lineal es que el almacenamiento al inicio del año hidrológico (1° de julio) deberá ser de 635 hm<sup>3</sup> para la presa La Boquilla y de 250 hm<sup>3</sup> para la presa Francisco I. Madero, lo cual da un total de 885 hm<sup>3</sup>. Si el almacenamiento estimado en ambas presas para el inicio del año hidrológico es menor que el calculado (885 hm<sup>3</sup>), el déficit deberá cubrirse con agua del subsuelo extraída mediante pozos profundos, cuidando de no afectar el rendimiento seguro del acuífero, o bien, efectuando un reajuste en el programa de extracciones.

#### Riesgos de derramar y de llegar a secar los vasos.

Durante la operación de los vasos de almacenamiento, deberán compararse los almacenamientos mensuales con los calculados para las curvas de volúmenes máximos y mínimos. Si en un mes determinado, los volúmenes almacenados son muy superiores a los definidos por la curva de volúmenes máximos, es recomendable aumentar las extracciones para disminuir el riesgo de derrames, y si son menores a los que señala la curva de volúmenes mínimos, entonces se deberá tratar de reducir las extracciones y hacer un uso más eficiente del recurso.

#### Resultados de la simulación

Con objeto de probar las reglas de operación propuestas, se realizó la simulación del funcionamiento de las presas de almacenamiento mediante los modelos descritos en los métodos, para lo cual se incluyeron, además, las siguientes restricciones:

Los volúmenes extraídos de las presas de almacenamiento para cada año agrícola, deben ser menores o iguales que los volúmenes medios anuales calculados anteriormente (1,156 y 361  $\text{hm}^3$  al año, para las presas La Boquilla y Francisco I. Madero, respectivamente).

Los niveles iniciales de los vasos de almacenamiento no deben ser mayores que los que indican las curvas de no derrame ni menores que los que marcan las curvas de no déficit.

Los resultados obtenidos de los modelos de simulación indican que las extracciones totales se incrementan en 851.3  $\text{hm}^3$  en la presa La Boquilla y en 791.3  $\text{hm}^3$  en la presa Francisco I. Madero, durante el período simulado, por lo cual aumenta considerablemente la eficiencia en el uso del agua en los vasos de almacenamiento, tal como se muestra a continuación.

### Eficiencia en el uso del agua en los vasos de almacenamiento

Con los ajustes hechos a la operación de las presas de almacenamiento, la eficiencia en el uso del agua se incrementa de 64.6 a 69.6 % en la presa La Boquilla y de 42.7 a 57.5 % en la presa Francisco I. Madero. Esto significa que las reglas de operación obtenidas pueden propiciar un incremento de 5.0 y 14.8 % en esta eficiencia, respectivamente.

### Variación de las extracciones de agua

Además de mejorarse la eficiencia en el uso del agua en los vasos de almacenamiento, con las reglas de operación propuestas las extracciones de ambas presas de almacenamiento son más uniformes a través del tiempo. En la Figura 8 se puede apreciar el comportamiento real de las extracciones así como los valores obtenidos en la simulación de la presa La Boquilla. El coeficiente de variación disminuye de 65 % a tan sólo 23 %, lo cual contribuye a mitigar los impactos de las variaciones en la disponibilidad del agua que tanto dañan la economía del distrito de riego y de la región donde se ubica.

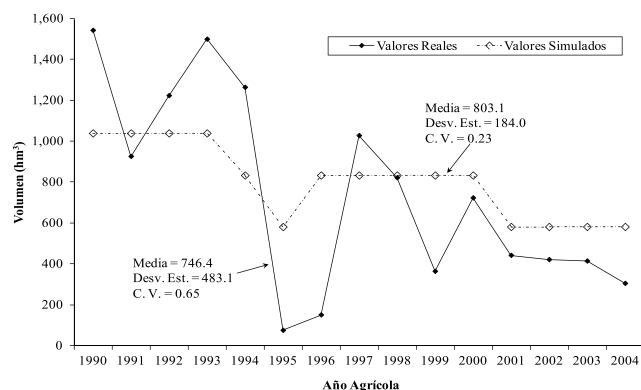


FIGURA 8. Conformación de los valores observados y simulados de las extracciones anuales de la presa La Boquilla.

Asimismo, para el caso de la presa Francisco I. Madero, en la Figura 9 se puede observar el comportamiento de los valores reales y simulados de extracciones de agua; en este caso el coeficiente de variación disminuye de 53 a 27% con la inclusión de las reglas de operación propuestas. Lo anterior se logra debido a que los modelos de simulación y el modelo de optimización se plantearon de tal manera que no permiten que las extracciones sean mayores a 1,038  $\text{hm}^3$  en la presa La Boquilla y a 285  $\text{hm}^3$  en la presa Francisco I. Madero, y como mínimo estas extracciones deben ser suficientes para satisfacer la superficie mínima de aquellos cultivos que tienen restricciones de piso.

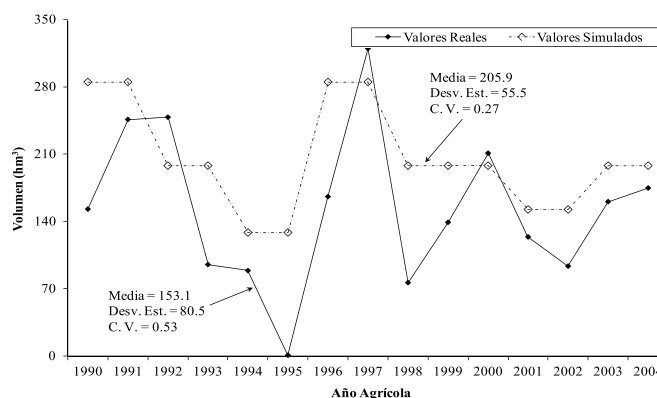


FIGURA 9. Conformación de los valores observados y simulados de las extracciones anuales de la presa Francisco I. Madero.

La poca variación en las extracciones de agua permite que la actividad agrícola en el distrito de riego y los beneficios netos de los productores no disminuyan a niveles drásticos como ocurrió en los años agrícolas 1992-1993 al 1994-1995, donde la extracción de las presas de almacenamiento fue mayor que los escurrimientos aportados, provocando que el volumen almacenado y disponible para el año agrícola 1994-1995 fuera el mínimo histórico, de tal manera que las presas no se abrieron para riego ese año por no alcanzar los niveles mínimos de operación, con las implicaciones sociales y económicas que esto trae como consecuencia.

De manera práctica, se recomienda que el programa de extracciones se ajuste a valores que oscilen entre 700 y 1,000  $\text{hm}^3$  para la presa La Boquilla, y entre 120 y 285  $\text{hm}^3$  para la presa Francisco I. Madero. Los promedios de las extracciones obtenidas en la simulación de los vasos son de 803.1  $\text{hm}^3$  para la presa La Boquilla y de 205.9  $\text{hm}^3$  para la presa Francisco I. Madero. Estos resultados son muy similares a los volúmenes sustentables calculados por la CONAGUA (2005), los cuales establecen que la extracción segura de las presas de almacenamiento debe ser de 831.8 y 216.0  $\text{hm}^3$ , respectivamente.

## CONCLUSIONES

El análisis de las políticas de extracción de agua de las presas de almacenamiento revela que en la práctica no se está aplicando una política de extracción en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola, ya que, para un mismo

almacenamiento registrado, se extraen diferentes volúmenes de agua y en algunos años se extrae más agua de la que entra a los vasos.

Por ello, es conveniente revisar la forma en que se ha operado el sistema y las posibilidades de mejorar el proceso, de tal manera que la demanda de agua se adapte a la oferta y no a la inversa, aplicando en la práctica una política de extracción en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola. Las reglas de operación propuestas, permiten establecer una política de extracción de agua de las presas en función de los volúmenes almacenados al inicio del año agrícola, ajustando el programa de extracciones de acuerdo con los niveles indicados por las curvas de volúmenes máximos y mínimos permisibles, para que a una cierta probabilidad los vasos no lleguen a derramar ni a secarse.

De manera práctica, se recomienda que el programa de extracciones anuales se ajuste a valores que oscilen entre 700 y 1,000 hm<sup>3</sup> para la presa La Boquilla y entre 120 y 300 hm<sup>3</sup> para la presa Francisco I. Madero, fijando como límite máximo de extracciones al valor de las aportaciones medias de cada presa, que es de 1,156 y 361 hm<sup>3</sup>, respectivamente (incluyendo salidas por evaporación). Aplicando las reglas de operación propuestas se mantienen de manera más uniforme los niveles de almacenamiento de las presas. De este modo, es factible establecer aproximadamente la misma superficie anual de 56,900 hectáreas en promedio, según los modelos de simulación, lo cual contribuye a mantener una economía más estable en la región.

## LITERATURA CITADA

- Acosta G.A.; Castañeda P.V. 1991. Operación de sistemas hidrológicos en sequías. *Ingeniería Hidráulica en México* 6(3): 41-57.
- Bergaoui M.; Alouini A. 2001. Carctérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du bassin Versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* 12(4): 205-213.
- Biswas A. K. 1976. Mathematical modeling and water resource planning. *In: Systems Approach to Water Management*. Biswas A. K. (ed.). McGraw-Hill, New York. pp. 398-414.
- DeGagne M. P. J.; Douglas G. G.; Hudson H. R.; Simonovic S. P. 1996. A decision support system for the analysis and use of stage-discharge rating curves. *Journal of Hydrology* 184(3-4): 225-241. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02973-7
- Emery D. A.; Meek, B. I. 1960. The simulation of a complex river system. Dunod, Paris. 65 p.
- Fournier J., M. 2001. L'eau dans les villes d'Amérique latine – Inégalités sociales et concurrences des usages. *L'Halmattan – Coll. Géographie Sociale*. Paris-Montréal-Budapest-Turin. 150 p.
- Hall W. A.; Dracup J. A. 1970. *Water resources systems engineering*. McGraw-Hill, New York. 368 p.
- Huang W. C.; Yang F. T. 1999. A handy decision support system for reservoir operation in Taiwan. *Journal of the American Water Resources Association* 33(5):1101-1112. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04197.x
- Ito K.; Xu Z. X.; Jinno K.; Kojiri T.; Kawamura A. 2001. Decision support system for surface water planning in river basins. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127(4): 272-276. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:4(272)
- Jolma A. 1994. A decision support system for real-time operation of a river system. *In: Advances in Water Resources Technology and Management*. Tsakiris G.; Santos M. A. (eds.). 2nd European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management, Lisbon, Portugal. June 14-18, 1994. EWRA, Rotterdam. pp. 141-146.
- Kelly, M. 2001. El río Conchos: un informe preliminar. Texas Center for Policy Studies. Austin, Texas. 34 p.
- Koutsoyiannis D.; Efstratiadis A.; Karavokiros G. 2002. A decision support tool for the management of multi-reservoir systems. *Journal of the American Water Resources Association* 38(4): 945-958. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2002.tb05536.x
- McCartney M. P. 2007. Decision support systems for large dam planning and operation in Africa. Paper 119. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 47 p.
- Ortega-Gaucin D.; Mejía S. E.; Palacios V. E.; Rendón P. L. 2009. Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana* 27(3): 219-226.
- Ortega-Gaucin D. 2012. Impacto socioeconómico de la sequía en un distrito de riego: estrategias para mitigarlo. Editorial Académica Española. Saarbrücken, Alemania. 212 p.
- Palacios V. E. 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 482 p.
- Simonovic S. P.; Savic D. A. 1989. Intelligent decision support and reservoir management and operations. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* 3(44): 367-385.
- Stansbury J.; Woldt W.; Bogardi I.; Bleed A. 1991. Decision support system for water transfer evaluation. *Water Resources Research* 27(4): 443-451. DOI: 10.1029/91WR00043
- Thorne J. M.; Savic D. A.; Weston A. 2003. Optimised conjunctive control rules for a system of water supply sources: Roadford Reservoir System (U.K.). *Water Resources Management* 17(3): 183-196. DOI: 10.1023/A:1024157210054
- Velasco V. I. 2002. Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego. Tesis de Doctorado en Ingeniería Hidráulica. DEPI/UNAM. Jiutepec, Morelos. 151 p.
- Zhang Y.; Xia J.; Chen J.; Zhang M. 2011. Water quantity and quality optimization modeling of dams operation based on SWAT in Wenyu River Catchment, China. *Environmental Monitoring and Assessment* 173(1-4): 409-430. DOI: 10.1007/s10661-010-1396-5
- Zhang N.; He H.M.; Zhang S.F.; Jiang X.H.; Xia Z.Q.; Huang F. 2012. Influence of reservoir operation in the upper reaches of the Yangtze river (China) on the inflow and outflow regime of the TGR-based on the improved SWAT model. *Water Resources Management* 26(3): 691-705. DOI: 10.1007/s11269-011-9939-2



## NOMENCLATURA

$B$	Beneficio anual (millones de \$)	$VAB_j$	Volumen almacenado en la presa La Boquilla al principio del mes 1 (octubre), ( $hm^3$ )
$Bm$	Beneficio medio obtenido por metro cúbico que entra a la presa ( $\$/m^3$ )	$AB_j$	Aportaciones por cuenca propia a la presa La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$X$	Volumen anual que se puede garantizar ( $hm^3$ )	$ENB_j$	Evaporación neta del vaso La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$Pv$	Pérdidas por unidad de volumen no servido ( $\$/m^3$ )	$ERB_j$	Extracciones para riego en el distrito de la presa La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$P_i$	Probabilidad de aportación del volumen $V_i$ (adimensional)	$EUD_j$	Extracciones para uso doméstico de la presa La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$V_i$	Volumen esperado con probabilidad $i$ ( $hm^3$ ) $V_i = X - Y_i$ si $X \geq Y_i$ o $V_i = 0$ si $X < Y_i$	$ELV_j$	Extracciones para Labores Viejas de la presa La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$Y_i$	Volumen extraído del vaso si la entrada $V_i$ ocurre ( $hm^3$ )	$DEB_j$	Derrames de la presa La Boquilla en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$i$	Índice de intervalos de clase (adimensional)	$VAF_{j+1}$	Volumen almacenado en la presa Francisco I. Madero al final del mes $j$ ( $hm^3$ )
$n$	Número de intervalos de clase, en el análisis de frecuencia de volúmenes de entrada (adimensional)	$VAF_i$	Volumen almacenado en la presa Francisco I. Madero al principio del mes 1 (octubre), ( $hm^3$ )
$S$	Volumen almacenado al inicio del año hidrológico (1° de julio), ( $hm^3$ )	$AF_j$	Aportaciones por cuenca propia a la presa Francisco I. Madero en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$CV$	Capacidad del vaso (nivel de aguas máximas ordinario, NAMO), ( $hm^3$ )	$ENF_j$	Evaporación neta del vaso Francisco I. Madero en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$C_j$	Volumen de demanda acumulado al mes $j$ ( $hm^3$ )	$ERF_j$	Extracciones para riego de la presa Francisco I. Madero en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$I_j$	Volumen almacenado en la presa al principio del mes $j$ ( $hm^3$ )	$DEF_j$	Derrames de la presa Francisco I. Madero en el mes $j$ ( $hm^3$ )
$Z_j$	Entradas acumuladas del mes $j$ , al final del año agrícola, sin que se presenten derrames ( $hm^3$ )	$Eu$	Eficiencia de uso del agua ( $hm^3$ )
$j$	Índice de meses (adimensional)	$Ex$	Extracción media anual ( $hm^3$ )
$max\ neg$	Valor máximo negativo que llegue a obtenerse de $I_j$ ( $hm^3$ )	$VA$	Volumen medio anual que entra al vaso ( $hm^3$ )
$Vd$	Volumen de almacenamiento muerto del vaso ( $hm^3$ )		
$VAB_{j+1}$	Volumen almacenado en la presa La Boquilla al final del mes $j$ ( $hm^3$ )		