

Automatización de sistemas de riego

Remo Loaiza García
Luis L. Espinosa Núñez
Dirección General de Administración y Control
de Sistemas Hidrológicos, SARH.

Arturo Jiménez Ramón
Planeación, Sistemas y Control

La mayor parte de los suelos cultivables del país se localiza en regiones áridas, donde la única forma de producción rentable se sustenta en el riego, que en la actualidad absorbe casi la totalidad de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, que pueden emplearse en la agricultura. Aun cuando la eficiencia del riego en esas regiones es mayor que la media nacional, el agua que efectivamente se consume en actividades agrícolas, representa apenas la cuarta parte de la que proporcionan las fuentes de abastecimiento. Esta situación, que reduce la eficiencia del riego, obedece principalmente a los derrames de los embalses y a las pérdidas por la operación deficiente de los sistemas de distribución, factores susceptibles de evitarse, por medio de políticas hidráulicamente flexibles que optimicen los beneficios del uso del agua. En este artículo se describen los diversos sistemas hidráulicos que existen en la actualidad para automatizar los canales de riego y que se orientan a incrementar la eficiencia en el manejo del agua. Asimismo, se indican los términos, secuencias y resultados del estudio de automatización realizado para el Distrito de Riego número 41, que se ubica en el Valle del río Yaqui, Sonora.

En términos generales, en los lugares con lluvias escasas y con régimen pluvial irregular los cultivos cíclicos de temporal no son rentables, como lo demuestran los resultados hasta ahora obtenidos. Esto se debe a que con frecuencia el valor comercial de la cosecha resulta inferior al costo de producción, lo que a su vez provoca que la agricultura se convierta frecuentemente en una actividad subsidiada mediante el seguro agrícola.

La mayor parte de los suelos cultivables del país se localiza en regiones áridas, donde la escasez de agua limita el desarrollo agrícola, ya que la única forma de producción rentable se basa en el riego. Por ello, el Gobierno Federal ha canalizado recursos cada vez más importantes al desarrollo de obras de irrigación en las zonas áridas. Como resultado, actualmente se utilizan casi en su totalidad las aguas superficiales y subterráneas disponibles para la agricultura en estas regiones, donde, además, numerosos acuíferos están sobreexplotados.

En tales circunstancias, sería inapropiado abrir

nuevas superficies de riego en zonas áridas para incrementar la producción agrícola. Lo anterior, en virtud de que, si se pretende realizar proyectos rentables sin afectar a los usuarios ya establecidos, las tierras aptas para el cultivo susceptibles de ser incorporadas al riego utilizando acuíferos exentos de sobreexplotación son muy limitadas, y aún más las que pueden abastecerse con aguas superficiales no comprometidas.

Aunque los sistemas de riego en zonas áridas tienen una eficiencia superior a la media nacional, todavía están lejos de alcanzarse los niveles deseables. Esto se debe a que el agua que efectivamente se emplea en el cultivo es apenas la cuarta parte de la que proporcionan las fuentes de abastecimiento.

La productividad obtenida mediante el agua que se asigna a una parcela es, en esencia, responsabilidad del productor. A su vez, el sector estatal, por conducto de la entidad gubernamental facultada para atender el ramo de irrigación, está obligado a suministrar agua para el riego, a

promover y auspiciar el extensionismo, a realizar estudios sobre la calidad y aptitud de los suelos agrícolas, a otorgar permisos de siembra, a definir y desarrollar especies y variedades aptas para la región, etc. Sin embargo, como dependencia administradora del recurso, su obligación principal es vigilar y mejorar la eficiencia del riego, mediante la adecuada operación de la fuente de abastecimiento y del sistema de distribución.

La evaporación, la infiltración y las fugas en general, por ser propias de las unidades de almacenamiento y distribución, representan pérdidas muy difíciles de evitar. Estos problemas sólo se pueden reducir por medio del diseño adecuado de las obras y el empleo de materiales y procedimientos de construcción que garanticen la impermeabilidad de vasos y canales, así como de sistemas apropiados de mantenimiento y conservación.

Los principales factores que reducen la eficiencia de las obras de irrigación son los derrames en los embalses y las pérdidas por excedentes de riego, conocidas como coleos. Sin embargo, ambos factores pueden superarse mediante técnicas de operación que permitan una mayor flexibilidad en la satisfacción de las demandas.

En efecto, los derrames de los embalses, e incluso los déficit de almacenamiento, pueden disminuirse o virtualmente eliminarse con el manejo combinado de aguas superficiales y subterráneas. Para ello, se aplican métodos basados en los datos históricos de precipitación-escurrimientos, mediante algoritmos que optimizan los beneficios del uso del agua.

Para reducir o evitar los coleos y, al mismo tiempo, asegurar que el suministro de agua a la parcela sea más eficaz tanto en cantidad como en oportunidad y con gastos que pueden considerarse constantes, se emplean cada vez con mayor éxito procedimientos de riego hidráulicamente flexibles. En ellos se invierte el sentido de la secuencia de la operación y se extrae del embalse sólo un volumen de agua equivalente al canalizado en periodos anteriores al área de cultivo (mediante la adaptación del régimen hidráulico en el sistema de distribución), en lugar de extraer el agua del vaso y conducirla para posteriormente aplicarla en el área de riego, como se hace hoy en día en México.

Esta metodología implica el desarrollo de análisis hidrológicos que deben considerar, entre otros parámetros, el volumen almacenado en el embalse, la capacidad de otras fuentes superficiales y subterráneas aprovechables, la precipitación

probable durante el periodo vegetativo de las siembras, el programa de riego y la capacidad de regulación del sistema de distribución.

Para diseñar o acondicionar un sistema de distribución con la capacidad reguladora que requiere la operación de esta modalidad del riego, es necesario elegir, de entre las opciones factibles, la que resulte más conveniente en el caso específico de que se trate. Deben tomarse en cuenta las secciones y pendientes de los canales, la ubicación y disposición de las estructuras, compuertas y tomas, y los espacios disponibles para las obras que se realicen con el fin de incrementar la capacidad reguladora del sistema.

Principios de regulación de los canales

A continuación se describen brevemente las condiciones generales para el buen funcionamiento de una red de distribución, así como las características esenciales de los sistemas hidráulicos para la operación de canales de riego.

Funcionamiento hidráulico de un sistema de riego

El funcionamiento de una red de distribución consiste en una sucesión de regímenes permanentes y transitorios. A fin de lograr una operación satisfactoria es necesario:

- a) *Establecer regímenes permanentes apropiados para solventar tanto el exceso como la falta de agua.*
- b) *Establecer regímenes transitorios adecuados para satisfacer plenamente la demanda de agua.*

Para el eficiente manejo del agua durante los regímenes permanentes, se requiere que el caudal de ingreso sea igual a las extracciones más las pérdidas; durante los regímenes transitorios, la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida debe ser compensada por el propio canal, mediante su almacenamiento de reserva.

Con el fin de evitar que los volúmenes que se extraen en las tomas laterales del canal resulten afectados por las variaciones de los regímenes, es necesario conocer su localización exacta, para asegurar que los caudales de agua que las alimentan permanezcan constantes.

Para alcanzar los objetivos antes señalados, deben reducirse las variaciones de los gastos, mediante la colocación de algunas estructuras, cuya utilidad será mayor si:

- a) Los canales son largos.
- b) El volumen de extracción es considerable.
- c) Los cambios de regímenes son frecuentes.

Sistemas de operación de canales

En general, todos los sistemas de regulación pretenden conseguir almacenamientos significativos en los canales, tiempos de respuesta cortos y secciones con niveles constantes para cualquier gasto. Entre los diversos sistemas para la operación de canales, destacan los que se describen brevemente a continuación.

Control aguas arriba

En los sistemas automáticos de regulación aguas arriba, las compuertas están equipadas con dispositivos que las hacen abrir o cerrar, de acuerdo con las variaciones que produce el nivel del agua correspondiente al tramo aguas arriba de la estructura. (Véase ilustración 1a).

Este sistema, sin automatizar, es el que se aplica con mayor frecuencia en México para la operación de los distritos de riego. Su principal inconveniente consiste en que, al presentarse un incremento súbito en la demanda, transcurre un lapso en el que el gasto conducido es menor al requerido, lo que origina una extracción menor que la solicitada. Por otra parte, el canal tampoco puede atender con eficiencia un "corte de riego", debido a que la inercia del agua que sale del

embalse inevitablemente provocará que los excedentes en el escurrimiento del canal superen la demanda.

Por lo anterior, el sistema de control aguas arriba resulta demasiado rígido para hacer frente al aumento o disminución en la demanda del líquido.

Control aguas abajo

En este caso, las compuertas disponen de mecanismos que les permiten elevarse o descender en la medida necesaria para mantener constante el nivel de aguas inmediatamente abajo de cada una de ellas. (Véase ilustración 1b).

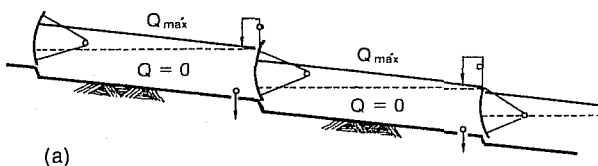
Los tramos entre estructuras pueden considerarse como depósitos. Así, cuando el caudal es nulo, la superficie del agua está al nivel de la estructura de aguas arriba; sin embargo, conforme crece la demanda, la superficie se inclina a partir de aguas arriba. La diferencia entre ambas superficies permite apreciar las variaciones del volumen que requieren los regímenes transitorios, hasta que una maniobra de las obras de cabeza corrige el desequilibrio que provoca la apertura progresiva de las estructuras que se encuentran aguas arriba del tramo analizado.

En este sistema, las variaciones de la demanda controlan el régimen del canal; por ello, las tomas deben situarse inmediatamente aguas abajo de las compuertas, donde las diferencias de los niveles son menores.

1. Sistemas de control

Control aguas arriba

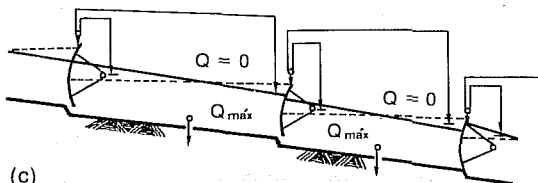
(nivel constante al final de cada tramo)
(requiere programar las descargas)



(a)

Control bival

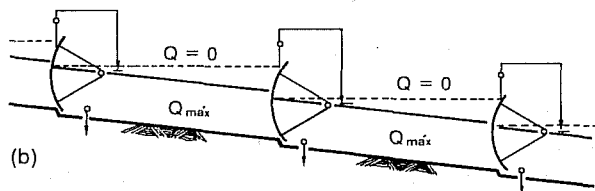
(nivel constante en una sección intermedia de cada tramo)
(demanda libre)



(c)

Control aguas abajo

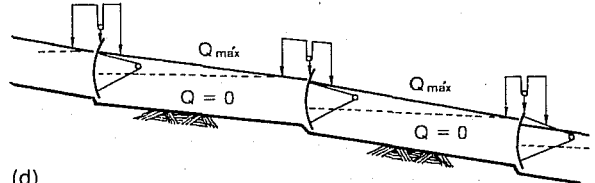
(nivel constante al inicio de cada tramo)
(demanda libre)



(b)

Control con niveles asociados cercanos

(no existe nivel constante)
(demanda libre)



(d)

La desventaja de este sistema con respecto al de control aguas arriba es el mayor costo de los bordos, que deben ser horizontales entre estructuras, por lo que su aplicación se limita a canales con pendiente suave, tanto por el costo de ejecución como por la dificultad de su construcción.

Sistema Bival

Este sistema se basa en el mismo principio que el de control aguas abajo. No obstante, a diferencia del anterior, en este caso las fluctuaciones de niveles se detectan mediante dos sensores colocados en los extremos del tramo (ilustración 1c). Por lo demás, el sistema Bival tiene la ventaja de que la sobreelevación de los bordos es menor que en el de control aguas abajo simple.

Las indicaciones de los sensores son simultáneas y permiten controlar periódicamente la compuerta situada aguas arriba. Cuando el caudal es nulo, la superficie del agua es horizontal en el tramo; si la demanda crece, la superficie se inclina y la compuerta de aguas arriba se abre. De esta manera, la superficie libre se recupera en un punto donde permanece constante el nivel del agua, el cual deberá situarse a la mitad del tramo o aguas arriba de la sección intermedia, por razones de estabilidad.

La señal relativa a los niveles se transmite, por medio de los sensores, a la compuerta aguas arriba del tramo, lo que permite responder con mayor rapidez a las demandas, en comparación con el sistema simple de control aguas abajo.

Por lo anterior, en el sistema Bival las reservas de agua en cada tramo son menores y, en consecuencia, la sobreelevación de los bordos será también menor.

Niveles asociados

En este sistema hidráulico de distribución, las compuertas están controladas por los niveles inmediatamente aguas arriba y aguas abajo. (Véase ilustración 1d).

Cada compuerta cuenta con un dispositivo mediante el cual se eleva o desciende, según la relación que exista entre los niveles aguas abajo (Δ_{Nav}) y aguas arriba (Δ_{Nam}). Esta relación se establece como:

$$\Delta_{Nam} = K \Delta_{Nav}$$

En la ecuación, K es el coeficiente que se determina para cada compuerta, a fin de que todos los perfiles de escurrimiento posibles sean compatibles con las cotas del canal.

Este sistema es muy útil cuando las variaciones en la demanda son importantes y permite obtener el máximo de reserva en el canal, así como limitar las fluctuaciones de niveles en situaciones anormales.

No requiere conocer con exactitud la localización de las tomas, ya que no se tiene un punto con variaciones mínimas, debido a que los niveles fluctúan en forma simultánea.

Como en el caso de control aguas abajo, existe un costo adicional por la sobreelevación de los bordos, el cual depende de las variaciones en la demanda.

Control PID (Proporcional Integral Diferencial)

En este sistema es necesario proveer de capacidad de almacenamiento a algunos tramos del canal para tener una regulación eficiente, o bien aprovechar los existentes para la formación de otros nuevos, evitando la sobreelevación de los bordos.

En los almacenamientos, los cambios de nivel reflejarán las variaciones de la demanda, lo cual permite adaptar sensores con dispositivos para el control de las compuertas de la fuente de abastecimiento, a fin de mantener constante el nivel de dichos almacenamientos.

Con objeto de reducir el volumen de los almacenamientos, en el sistema PID se toman en cuenta la posición de los niveles arriba y abajo con respecto al de referencia, la diferencia de cotas entre ellos ($Z_{ref} - Z_t$), el nivel ($Z_{t-\Delta t}$) y la variación del caudal ($\Delta Q_{t-\Delta t}$) registrada en la maniobra. En la maniobra de la compuerta, la modificación del caudal (ΔQ) que deberá fluir está definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta Q = A (Z_{t-\Delta t} - Z_t) + B (Z_{ref} - Z_t) - \Delta Q_{t-\Delta t} \quad (1)$$

En la ecuación 1, A es un coeficiente que depende de la superficie promedio ocupada por el almacenamiento y es inversamente proporcional al intervalo entre las detecciones de los niveles (Δt).

Por su parte, B es un coeficiente adimensional de amortiguamiento.

Es importante señalar que, además del equipo para la detección y transmisión de los niveles, este sistema requiere de un microprocesador.

Análisis del funcionamiento hidráulico de los sistemas de regulación

En el análisis del funcionamiento hidráulico de un

sistema de canales de distribución se debe prever:

- Que los niveles del agua permanezcan dentro de los límites establecidos.
- Que los caudales de entrada correspondan a la demanda existente.
- Que las fluctuaciones en los niveles y gastos no sean demasiado rápidas (oscilaciones).
- Que las fluctuaciones producidas en un régimen transitorio se amortigüen al pasar a uno permanente.

Para analizar y evaluar las condiciones hidráulicas de un sistema de distribución, existe un modelo matemático que permite simular el flujo transitorio en canales de riego operados por compuertas. Este modelo se basa en las ecuaciones de Barre de Saint Venant para describir los fenómenos de flujo transitorio, que se obtienen al cumplirse los principios hidrodinámicos de conservación de masas (continuidad) y de impulso y cantidad de movimiento (dinámica), cuyas expresiones son las siguientes:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{V}{2} \right) + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{k^2} = 0 \quad (3)$$

En las ecuaciones 2 y 3, B es el ancho de la superficie del agua en la sección transversal; g , la aceleración de la gravedad; k , la conductividad hidráulica de la sección, que según la fórmula de Manning vale $AR^{4/3}/n$, donde A representa el área hidráulica, R el radio hidráulico y n el coeficiente de rugosidad; Q es el gasto a través de la sección; t , el tiempo; v , la velocidad media; x , la distancia entre la sección y un punto de referencia determinado; Z es la elevación de la superficie del agua respecto a un plano de referencia horizontal; y α es el coeficiente de corrección por distribución no uniforme de la velocidad en la sección transversal.

Ambas ecuaciones se resuelven por diferencias finitas, con base en un "esquema implícito de cuatro puntos" y mediante el "algoritmo de doble barrida" que en forma sucinta es el siguiente:

- Las dos ecuaciones diferenciales, expresadas en términos de valores para puntos e instantes fijos e incrementos entre tales valores, se simplifican —por medio del esquema de cuatro puntos— en un plano con la distancia x como abscisa y el tiempo t como ordenada. A su vez, el segundo introduce al factor θ que más ade-

lante permitirá controlar la estabilidad y convergencia del modelo.

- El método de la doble barrida permite solucionar el problema, según se representa en la ilustración 2. Como puede observarse, este método se caracteriza por ser de diferencias finitas e implícito, con lo cual pueden resolverse las ecuaciones en un punto del flujo, antes de pasar al siguiente. Sin embargo, para ello se requiere calcular previamente una serie de coeficientes, siguiendo un recorrido inverso al del cálculo de las incógnitas que interesan.

Diseño de sistemas automáticos de operación

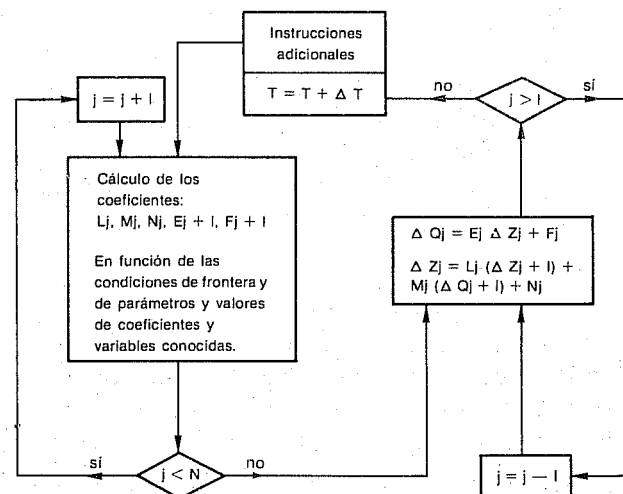
El resto del presente artículo se refiere, de manera sintética, a los términos, secuencias y resultados del estudio de automatización relativo al Distrito de Riego número 41, ubicado en el Valle del río Yaqui, estado de Sonora.

Generalidades

El estudio siguiente se refiere a un proyecto desarrollado durante 1980 por la Dirección General de Planeación Regional de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico.

Este distrito fue seleccionado por el notable desarrollo agrícola e hidráulico que se presenta en la región, el cual se debe a que la corriente principal del río Yaqui cuenta con cuatro presas de regulación. Los almacenamientos de estas presas compensan con mucho el escurrimiento medio anual del río, y los mecanismos para evitar

2. Diagrama del método de la doble barrida



pérdidas por derrames en los vasos ya están cubiertos desde el punto de vista estructural.

Además, el desarrollo agrícola de la región y la eficiencia de distribución del distrito son considerablemente altos en comparación con el promedio nacional. Así, en cuanto a su grado de adelanto, dicho sistema tiene características superiores a las de otros lugares de la República, siendo la automatización una opción para lograr un incremento sustancial en su eficiencia.

Al igual que en la mayor parte de los distritos de riego del país, la eficiencia del distrito número 41 se calculó tomando en consideración la eficiencia parcelaria y la de conducción, que fueron de 90% y 63%, respectivamente; como resultado, su eficiencia global se estimó en 57%. Los dos últimos porcentajes, aunque superan la media nacional, revelan pérdidas muy importantes en los volúmenes de agua empleados para la producción agrícola (1 286 Mm³). La mayor parte de dichas pérdidas obedece a la rigidez del sistema hidráulico, el cual se basa en el control aguas arriba, que implica una programación anticipada susceptible de ser afectada con mucha facilidad.

Condiciones actuales del distrito

El Distrito de Riego número 41, localizado —como ya se indicó— en la región noroeste de México, específicamente en el sur del estado de Sonora (véase ilustración 3), aprovecha los escurrimientos del río Yaqui, que se controlan mediante cuatro embalses. El último de ellos es la presa Alvaro Obregón, que proporciona alrededor de 2485 millones de m³ por año, a los cuales se añade un volumen aproximado de 505 millones de m³ de agua de pozos situados en el propio Valle del Yaqui.

La superficie física del distrito comprende aproximadamente 215 000 hectáreas, divididas en cuatro unidades, cuya intensidad de cultivo promedio es de 1.22, lo que equivale a 262 000 hectáreas cosechadas con trigo, soya, cártamo y maíz, que son los principales cultivos.

El sistema de distribución del distrito puede describirse, a grandes rasgos, de la siguiente manera:

En la presa Alvaro Obregón existen dos obras de toma: una alta, operada por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, da origen al denominado Canal Principal Alto; la otra, que opera en forma conjunta la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, se sitúa en la margen dere-

cha y se emplea principalmente para generar energía eléctrica y, en segundo término, para abastecer al Distrito de Riego número 18 y al Canal Bajo del número 41.

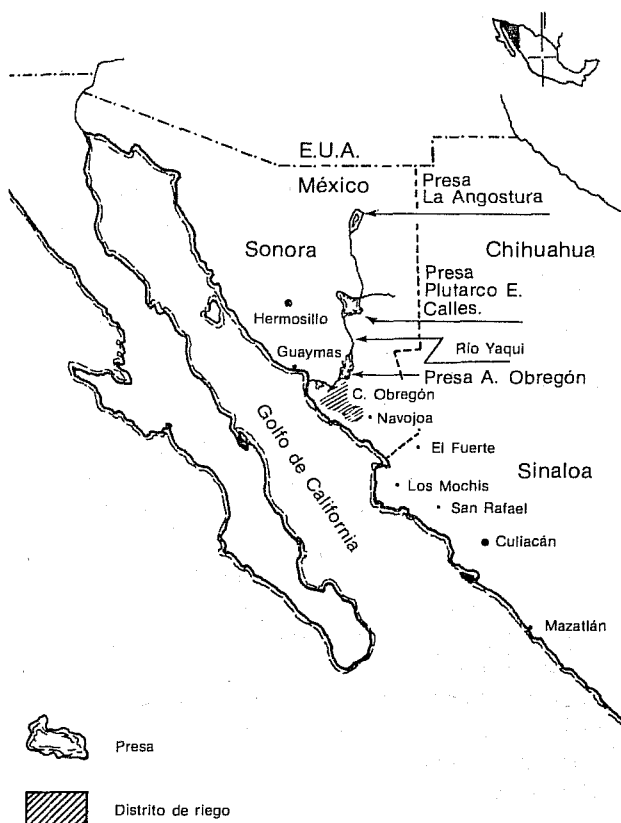
El Canal Principal Alto, en sus primeros 42 km, no tiene prácticamente tomas y presenta una pendiente relativamente pronunciada; está revestido de concreto con varios vasos reguladores, de entre los cuales sobresalen, por su tamaño, los denominados El Potrero y Agua Caliente.

El Canal Bajo comienza en la presa Hornos, situada sobre el cauce del río Yaqui; su longitud es de 97.5 km, carece de revestimiento y a lo largo de su recorrido, mediante canales laterales, se deriva hacia todas las secciones de las unidades Tercera y Cuarta.

El Canal Alto conduce un volumen aproximado de 1 140 millones de m³ anuales, por medio del cual se abastece una superficie de 86 000 hectáreas. A su vez, el Canal Bajo transporta un promedio anual de 1 345 millones de m³, que se utilizan para el riego de 129 000 hectáreas. En la ilustración 4 se presenta un plano general del Distrito de Riego número 41.

Cabe aclarar que la presa Alvaro Obregón pro-

3. Distrito de riego No. 41, río Yaqui



porciona el agua necesaria para el riego de 24 000 hectáreas pertenecientes a la tribu yaqui, en el Distrito número 18.

Opciones para mejorar el funcionamiento hidráulico del sistema de distribución

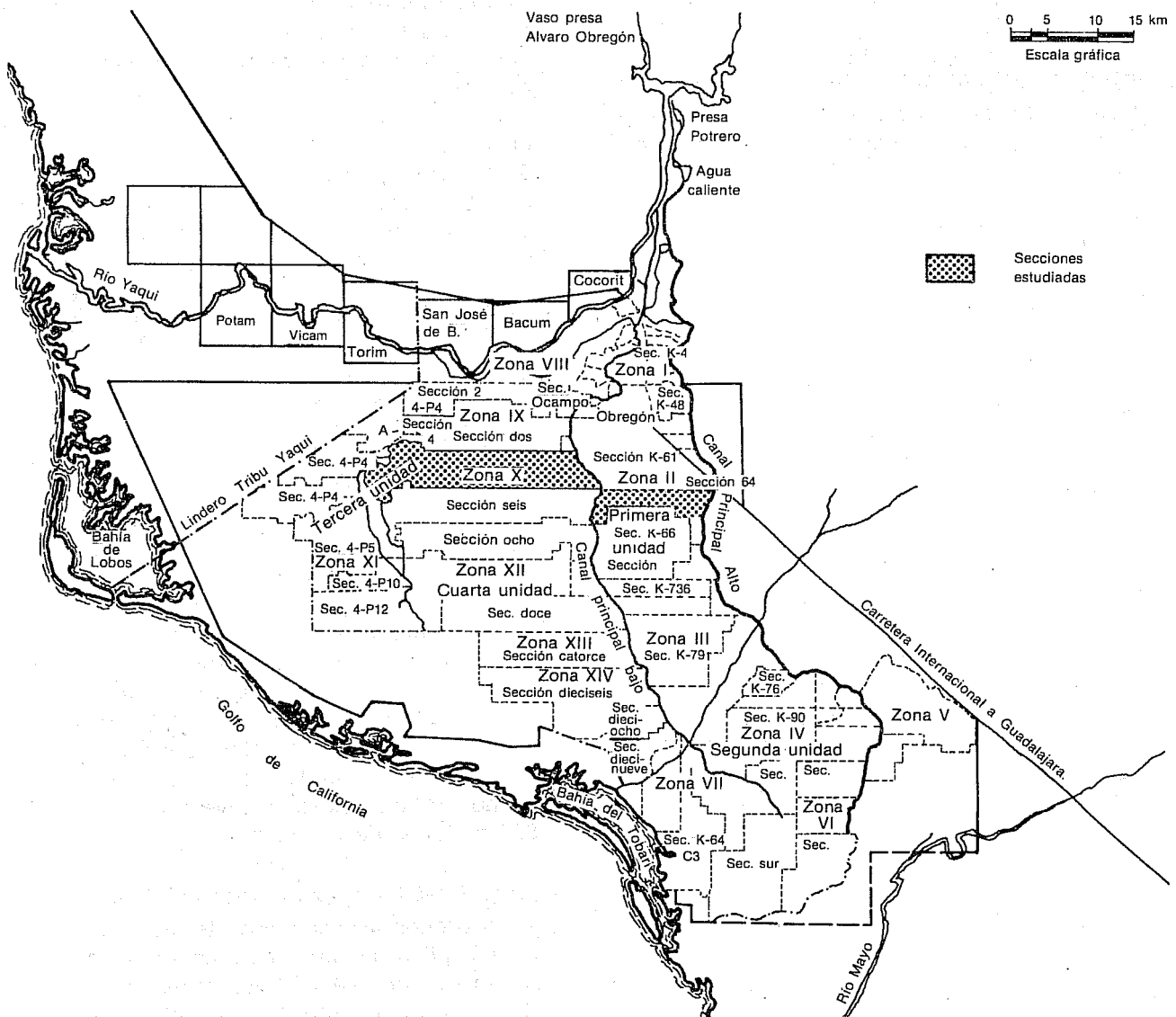
En esta fase del estudio se empleó un enfoque metodológico de cinco pasos, que son: el análisis hidráulico teórico, la caracterización de los sistemas de regulación, la selección del equipo, la evaluación del sistema y la elección de la mejor opción.

Para seleccionar la mejor opción recomendable, se subdividieron los canales de distribución de la siguiente manera:

- El Canal Alto se dividió en dos tramos: uno, denominado Muerto, que va desde la presa Alvaro Obregón hasta el vaso Agua Caliente, presenta pendientes relativamente pronunciadas (0.3 m/km) y conducciones importantes sin tomas de agua; el segundo, denominado Canal Distribuidor, corre del vaso Agua Caliente a la represa ubicada en el kilómetro 105, con pendientes más suaves y varias tomas.

Como un ejemplo de los canales laterales de gasto bajo (4 m³/s), se estudió el Canal Lateral K-64, cuya pendiente es atenuada mediante represas sucesivas separadas por caídas, y se incluyeron, además, los canales sublaterales, ramales de su precedente, los cuales conducen un caudal pequeño de aproximadamente 500 l/s.

4. Secciones estudiadas en el Distrito de Riego No. 41, río Yaqui



- El Canal Bajo se dividió en tres grandes tramos: el que va de la presa Alvaro Obregón a la derivadora Hornos, sobre el cauce del río Yaqui; el segundo, que se inicia en la represa Hornos y se prolonga hasta el kilómetro 92+600, tiene una pendiente suave (0.15 m/km); el tercer tramo, que comprende desde el kilómetro 92+600 hasta el final del canal, presenta una pendiente aún más suave y cuenta con sólo dos tomas, mediante las cuales se atienden 800 hectáreas, aproximadamente.

Como en el caso del Canal Principal Alto, se incluyeron canales laterales (el número 4 se tomó como típico de gasto importante, con 28 m³/s, y pendiente suave) y canales sublaterales que se consideraron de la misma forma. En relación con las condiciones hidráulicas y a la demanda de agua en cada uno de los tramos se plantearon las opciones descritas en el cuadro 1.

El funcionamiento hidráulico se simuló mediante la aplicación del modelo matemático desarrollado específicamente para este distrito. En él se tomaron en cuenta las condiciones del flujo transitorio de los canales de riego contro-

lados por compuertas, ya sean automáticas o manuales.

Características de los resultados para la solución propuesta

Antes de iniciar este apartado, conviene aclarar que la solución propuesta se elegirá por tener un funcionamiento hidráulico flexible, por su economía en el uso del agua y porque aumenta la eficacia del sistema de distribución en casi un 20%.

A continuación se describen las características generales de la solución propuesta con respecto a cada uno de los tramos, así como las razones que motivaron su elección.

Canal Principal Alto

- **Tramo Muerto.** La opción que se consideró más adecuada fue aquella en la cual el control se lleva a cabo en el embalse Agua Caliente, debido a que las modificaciones propuestas para la instalación de regulación eléctrica, tanto en el embalse como en la obra de toma de la presa Alvaro Obregón, son muy simples. Se requiere adoptar el sistema PID, a fin de obtener condiciones de operación aceptables, lo mismo en el embalse que en la obra de toma.

Mediante esta solución puede disponerse de un sistema de regulación simple para responder a una demanda flexible y evitar la necesidad de programar la distribución.

Sin considerar los costos del proyecto constructivo, la inversión que se requiere para llevar a la práctica esta opción, es de aproximadamente 75 millones de pesos, a precios de 1984.

- **Canal de distribución.** Las condiciones de funcionamiento hidráulico más favorables corresponden al sistema Bival, es decir, a la opción 3, que es una variante del sistema de control de aguas abajo. La velocidad de respuesta de las compuertas es rápida, gracias a la teletransmisión; el breve tiempo de respuesta permite reducir los volúmenes de almacenamiento y, en consecuencia, limitar la sobreelevación de bordos. Para este caso la inversión se estimó en 807 millones de pesos, a precios de 1984.
- **Lateral K-64.** La opción recomendada consiste en mantener niveles constantes aguas arriba, lo cual implica sustituir las compuertas actuales por una batería de módulos de gasto constante. Se requeriría construir 13 vertedores en forma

1. Descripción de alternativas

Tramo	Características de la alternativa
CANAL ALTO	
* Tramo muerto	1. Control de niveles en el embalse de Agua Caliente. 2. Niveles constantes aguas abajo a) Con compuertas eléctricas b) Con compuertas hidráulicas 3. Sistema Bival 4. Niveles asociados
* Canal de distribución	1. Niveles constantes aguas arriba a) Con compuertas eléctricas b) Con compuertas hidráulicas 2. Niveles constantes aguas abajo a) Con compuertas eléctricas b) Con compuertas hidráulicas 3. Sistema Bival 4. Niveles asociados
* Lateral K-64	1. Niveles constantes aguas arriba 2. Niveles constantes aguas abajo
* Sublaterales	1. Control aguas arriba
CANAL BAJO	
* Tramo río Yaqui	1. Control de niveles en el embalse Hornos
* Canal de distribución	1. Niveles constantes aguas arriba a) Con compuertas eléctricas b) Con vertedores 2. Niveles constantes aguas abajo a) Con compuertas eléctricas b) Con compuertas hidráulicas 3. Sistema Bival 4. Niveles asociados 5. Sistema PID con niveles asociados remotos.
* Lateral 4	1. Niveles constantes aguas arriba 2. Niveles constantes aguas abajo
* Sublaterales	1. Control aguas arriba

de pico de pato para subdividir el canal, con el fin de regular el nivel del agua. La opción de niveles constantes de aguas abajo es la mejor desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico; sin embargo, el bajo caudal del lateral K-64 y la pronunciada pendiente natural del terreno hacen que esta solución sea difícil de realizar y muy costosa.

La inversión necesaria para la opción de niveles constantes aguas arriba sería de 106 millones de pesos, a precios de 1984. Adicionalmente, se requieren alrededor de 58 000 pesos por hectárea para el equipo hidromecánico, a fin de regular los sublaterales, lo que en esencia consiste en los módulos para la distribución del agua.

Canal Principal Bajo

- *Tramo del río Yaqui.* El resultado de la simulación de este sistema se obtuvo mediante el análisis minucioso de la opción propuesta: el control de niveles en la derivadora Hornos. Debido a que no se disponía de un mayor volumen de regulación, los resultados conseguidos no fueron los que se esperaban para este tramo del canal. Por lo anterior, fue necesario considerar un sistema PID y niveles asociados remotos para resolver la problemática de este caso en particular.

Así, se acoplaron los dos tramos iniciales del Canal Bajo con la represa Hornos, para lo cual se consideraron los primeros 33 km. del canal. En estos dos tramos, los niveles suben o bajan junto con los de la presa Hornos por medio de un equipo de compuertas controladas, empleando las señales de control de las compuertas ubicadas en la central hidroeléctrica, en donde se origina el canal. Todo ello mediante un sistema de control PID.

Para llevar a la práctica esta solución se requiere de un microprocesador, que podría integrarse al tablero de supervisión de la central hidroeléctrica. Así mismo, para conocer las condiciones de operación del bordo libre en los dos tramos, también es necesario instalar dos reguladores intermedios (uno entre Hornos y P. Díaz y otro entre P. Díaz y Nainari).

La solución propuesta abarca dos tramos asociados, que van desde la presa Alvaro Obregón hasta el kilómetro 13 + 000 del Canal Bajo. La inversión necesaria sería del orden de los 1 213 millones de pesos, a precios de 1984.

- *Canal de distribución.* La solución con las mejores condiciones de operación fue el empleo del sistema Bival, en la opción que considera el Canal Principal Bajo del kilómetro 13+000 en adelante. La respuesta rápida del canal a las variaciones en el régimen de escurrimiento, que se logra con esta configuración, permite reducir los volúmenes de almacenamiento en comparación con los requeridos para la solución del control aguas abajo.

La detección de los niveles al inicio y al final de cada tramo permite enviar las señales a las compuertas situadas en el origen. Sin embargo, las modificaciones necesarias son considerables, ya que se requiere instalar compuertas radiales operadas por medio de electricidad, así como sensores. La inversión correspondiente se calculó en 2 956 millones de pesos, a precios de 1984.

- *Canal Lateral 4.* La mejor opción para esta sección de la red del distrito consistió en mantener niveles constantes aguas abajo, para disponer de regímenes transitorios sin pérdidas ni excesos de agua. La toma se realizaría en el origen, por medio de la electrificación y automatización de las compuertas radiales instaladas. No obstante, se requeriría la sobreelevación de los bordos, con lo cual el costo para la modificación en esta parte del sistema sería de 792 millones de pesos, a precios de 1984. A fin de completar la regulación hasta los sublaterales se requiere de una cantidad adicional para instalar los módulos de derivación.

Conclusiones

La automatización del Distrito de Riego número 41 del Valle del Yaqui permitiría rescatar volúmenes importantes de agua, en virtud de que proporcionaría flexibilidad al sistema de distribución. El resumen de los resultados obtenidos por medio del estudio se presenta en el cuadro 2, en el cual puede observarse que:

- El costo total para la automatización del sistema es de 24 377 millones de pesos, a precios de 1984.
- El volumen de agua recuperable mediante la automatización del Distrito de Riego número 41 se calcula en 500 millones de m³, que podrían emplearse para incrementar hasta en 53 600 hectáreas la superficie atendida en segundos cultivos.
- La eficiencia total del sistema se incrementa en

2. Resumen de resultados

Tramo	Control	Estructuras (compuertas)	Inversión (M \$ 84)
CANAL ALTO			
a) Muerto	PID en Agua Caliente	eléctricas (existentes)	75.4
b) Distribución	Bival	eléctricas (existentes)	807.0
c) K-64	Aguas arriba	vertedores	106.0
CANAL BAJO			
a) Río Yaqui	PID y niveles asociados (hasta Nainari)	eléctricas (nuevas en su mayoría)	1 213.0
b) Distribución	Bival.	eléctricas (nuevas)	2 956.0
c) Lateral-4	aguas abajo	hidromecánicos	792.0
Conjunto de canales laterales	según el caso	según el caso	8 294.0
Distribución a partir de laterales	aguas arriba	módulos vertedores	10 133.8
Inversión total para el mejoramiento del distrito			24 377.2

3. Superficies incorporadas al riego

Canales mejorados	Volumen rescatado (Mm ³)	Incremento en superficie (ha)	Costo de ha nueva (\$/ha)
Principales	275	29 200	173 000
Laterales	118	12 600	658 250
Menores	111	11 800	858 797
Totales	504	53 600	438 048

un 20%, en virtud de las nuevas condiciones de distribución por los canales, lográndose asimismo, el abastecimiento oportuno y preciso de las demandas.

- El costo promedio de la superficie incorporada a segundos cultivos es de 438 048 pesos por hectárea, según el desglose que aparece en el cuadro 3.

Con respecto a la distribución y el control del agua que se aplica a los cultivos, los resultados obtenidos permiten concluir que la automatización representa un avance importante en la operación de los sistemas de riego. Esto, sin considerar el beneficio adicional que significa el aumento de la productividad, mediante el riego biológicamente más oportuno.

En consecuencia, se recomienda automatizar los sistemas con un desarrollo agrícola superior a la media nacional, sobre todo en los que cuentan con transferencia de agua entre cuencas vecinas (por ejemplo, los Distritos de Riego número 10 y número 75, de Culiacán y Río Fuerte, Sin., respectivamente), así como en los que surjan en el futuro con estas características.

Bibliografía

- Bouillot R., *Hydraulique Agricole et Urbaine*. France, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1976.
- Buenfil, M., *Memoria descriptiva del programa SYCYAQ*, México, Documento Interno, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, 1980.
- Huerta, J., *El uso del agua en Irrigación*, México, Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, 1977.
- FAO, *El riego automatizado*, Roma, 1974.
- Comisión del Plan Nacional Hidráulico, *Mejoramiento de la distribución de agua en la red de riego del Distrito del río Yaqui, Son.* Ciudad Obregón, México, 1980.
- Yevjevich V., *Unsteady Flow in Open Channels*. Fort Collins, Colorado, U.S.A., Water Resources Publication, 1975.