

*Mejoramiento de la
operación de los sistemas
de riego por gravedad*

Hervé Plusquellec

IMTA 
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
COORDINACION DE TECNOLOGIA DE RIEGO Y DRENAJE

SERIE DIDACTICA 9



IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCION

El lector se obliga a devolver este libro antes del
vencimiento del préstamo señalado por el último sello

26 3 93 DEVUELTO		
---------------------	--	--

IMTA / CCA / F / PD.

FORMA IMTA-D-036

Apartado Postal 202 CIVAC, Mor. 62500
Jutepec, Mor.

COMISION NACIONAL DEL AGUA

*Mejoramiento de la
operación de los sistemas
de riego por gravedad*

IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA 

BANCO MUNDIAL
Instituto de Desarrollo Económico y
Departamento de Agricultura y Desarrollo Rural
Hervé Plusquellec

Septiembre, 1990

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

Cat. 9627.52
P62/45385
Adq. 42417
Pres. _____
Pres. _____
Fecha 22.01.02

1a. edición en inglés, marzo de 1988
Traducción al español, septiembre de 1989

Traducción de *Improving the operation of canal systems*, realizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje.

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

I N D I C E

INTRODUCCION	1
SUGERENCIAS PARA EL USO DE ESTE MANUAL	2
PARTE I NECESIDADES DE MEJORAR LOS SISTEMAS DE IRRIGACION	3
PARTE II ANTIGUOS ENFOQUES CONCEPTUALES	15
PARTE III CONTROL HIDRAULICO EN CANALES	23
PARTE IV OPERACION DE LOS SISTEMAS CON CONTROLES LOCALES Y REMOTOS	29
PARTE V CONTROL CENTRALIZADO	36
PARTE VI EQUIPO DE CONTROL	45
PARTE VII SELECCION DEL METODO DE CONTROL MAS ADECUADO	57

INTRODUCCION

El material didáctico Improving the Operation of Canal Systems, consistente en una serie de diapositivas con pista de audio y un texto impreso, se realizó en forma conjunta por The Economic Development Institute y The Agricultural and Rural Development Department of the World Bank, publicándose en marzo de 1988.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de la Comisión Nacional del Agua, consideró conveniente difundir una versión en español de ese material. Para ello, tradujo el texto impreso y la pista de audio, editando y completando la serie de diapositivas en video educativo. Los números de los párrafos del presente trabajo, corresponden al orden de las diapositivas del trabajo original. La versión en español está disponible en formatos Beta, VHS, U-MATIC y en Sistema NTSC.

Se trata de promover entre técnicos mexicanos y de otros países, el conocimiento de experiencias sobre operación de sistemas de irrigación en diferentes partes del mundo. A través de los debates que se susciten en torno a los diferentes temas abordados, será posible obtener recomendaciones aplicables para mejorar la operación de los sistemas de irrigación.

El material de esta versión en español, se presenta en siete partes:

En la primera se revisan los aspectos más importantes de la planeación y el diseño de los sistemas de irrigación y los problemas relacionados con la distribución y con los métodos de control del agua para riego. La segunda parte se ocupa de los principios de la distribución del agua en la mayoría de los sistemas tradicionales de irrigación. La tercera, examina la conducción del agua por canales abiertos, en base a dos aspectos del control del agua: el gasto y el tirante en los canales.

La operación del sistema de irrigación, compuesto de un canal principal y una compleja red de canales secundarios y terciarios, se revisa en la cuarta parte. En la quinta, se repasan los métodos centralizados de control de la red de canales, orientados a los operadores y a los agricultores. La sexta parte, analiza el equipo de control local en varios puntos del sistema de irrigación y las características de algunos equipos de control remoto y centralizado. Finalmente, en la séptima parte se abordan los múltiples factores que influyen en la selección de tecnologías, tanto para la construcción de nuevos sistemas como para la modernización de los ya existentes.

SUGERENCIAS PARA EL USO DE ESTE MATERIAL

1.- Para obtener el máximo beneficio de este material se recomienda que el personal encargado de su presentación tenga experiencia en los temas tratados, y que se familiarice con el material antes de hacer la presentación, ya que deberá resolver las dudas que se presenten.

2.- A fin de contar con el tiempo suficiente para el análisis, la discusión y la comprensión de cada uno de los temas, es conveniente que la presentación de este material se lleve a cabo en seis sesiones de dos horas cada una, con la primera y la segunda parte en una sola. Las sesiones podrían distribuirse a lo largo de tres días, con el objeto de que los participantes dispongan de tiempo para revisar el material impreso y sus propias notas de trabajo. Es evidente que cuando el material se emplee con propósitos de capacitación, las sesiones deberán ser tan extensas como lo requiera la profundización de los temas.

3.- Además, cuando se trate de capacitación, es conveniente que después de observar el contenido de cada una de las partes del video, se lleve a cabo una amplia discusión sobre el tema hasta lograr su total comprensión con fines de aplicación práctica. La experiencia indica la conveniencia de que los participantes lleguen, a conclusiones al final de cada sesión, las cuales deberán estar relacionadas con el mejoramiento de las áreas de riego a las que estén vinculados.

1. PARTE I: NECESIDAD DE MEJORAR LOS SISTEMAS DE IRRIGACION.

2. En la actualidad, a nivel mundial, se riegan 275 millones de hectáreas aproximadamente.

3. La importancia del riego y del drenaje se manifiesta por: una mayor producción agrícola, la creciente inversión en proyectos de riego y drenaje y su efecto sobre el desarrollo económico y social.

4. En los últimos treinta años las superficies de riego se han incrementado en cerca de cuatro millones de hectáreas por año. El resultado ha sido un aumento notable en la producción de arroz, trigo y otros cultivos. Son varios los países que proyectan duplicar la superficie con riego para fines de este siglo.

5. A pesar de estos logros tan impresionantes, los funcionarios de los gobiernos y de las instituciones financieras, responsables de la elaboración de las políticas y de la toma de decisiones, empiezan a preocuparse porque en los sistemas de irrigación se están obteniendo resultados inferiores a los que, en potencia, podrían esperarse.

6. Son muchos los factores causantes de estos resultados.

Primero: la baja eficiencia del uso del agua, que en muchos de estos sistemas puede llegar a ser del 30% o menor, mientras que en los sistemas bien manejados, se obtienen eficiencias del 50% o mayores.

7. Segundo: la falta de uniformidad en la distribución del agua a los agricultores, origina excedentes en algunas zonas y déficits del líquido en otras. En épocas de escasez, los agricultores mejor ubicados en relación con los canales de distribución, aprovechan esta situación para asegurar su abastecimiento de agua.

8. Tercero: en zonas áridas y semi-áridas se presentan problemas de anegamiento y de salinidad, debido principalmente al drenaje agrícola deficiente.

9. Cuarto: debido a deficiencias severas en el manejo del agua para riego, los beneficios que se obtienen en muchos sistemas de irrigación son muy inferiores a los esperados. Como resultado, las áreas bajo riego, son menores y con rendimientos inferiores a los que se habían estimado en la etapa de planeación.
10. Por ejemplo, el rendimiento de arroz palay varía de 2 a 3 toneladas por hectárea en varios países, pero en mejores condiciones de drenaje y control en el suministro del agua, el rendimiento promedio puede llegar a 5 y hasta 6 toneladas por hectárea.
11. Quinto: cuando el suministro de agua no es confiable, los agricultores no se sienten motivados para organizarse, menos aún para participar en la operación y el mantenimiento de la red terciaria de canales de distribución. Asimismo, están menos dispuestos a pagar las tarifas por suministro de agua si el servicio es malo.
12. Sexto: los problemas de operación en muchos sistemas, empeoran cuando se diferren los trabajos de mantenimiento debido a la escasez de recursos económicos. Por otra parte, la falta de mantenimiento redundo en un deterioro muy rápido de la infraestructura de los mismos.
13. Existe un acuerdo unánime a nivel mundial, acerca de la necesidad de mejorar la operación de los sistemas de irrigación para elevar su productividad. Las soluciones más recomendadas incluyen: el mejoramiento en el manejo de los recursos hidráulicos; mayor coordinación entre las instituciones involucradas en la producción agropecuaria y los responsables de los sistemas de irrigación, mejorar la capacitación, aumentar presupuestos para cubrir los costos de operación y mantenimiento; incrementar las tarifas de suministro de agua y la participación de los agricultores. Sin embargo, estas soluciones no siempre han logrado mejorar de manera significativa dicha situación.
14. En muchos casos, los problemas de operación más evidentes están relacionados con el desperdicio de agua en la red de distribución, debido a insuficientes regaderas. En la década de los setenta, una respuesta frecuente a este problema fue fomentar el desarrollo a nivel de finca y la organización de asociaciones de agricultores. Esto resolvió el problema sólo en forma parcial.

15. Actualmente, se reconoce que los problemas que se presentan a nivel de predio, con frecuencia se deben al mal manejo de la red de distribución aguas arriba. Por ejemplo, algunas regaderas no reciben gasto suficiente, debido a que el nivel del agua en el canal secundario es demasiado bajo. Es requisito indispensable que exista un manejo correcto del sistema principal, para que los usuarios participen en la operación y mantenimiento de las tomas granjas.
16. En varios proyectos piloto, se han logrado resultados significativos adoptando un mejor sistema de operación y para mejorar su funcionamiento, en algunos casos ha sido necesario realizar cambios en la infraestructura. Una mejor operación del sistema, no basta por sí misma para incrementar su eficiencia. Es más, debido a limitaciones financieras y a la falta de capacitación, muchas dependencias no se encuentran en posición de aumentar su plantilla de personal hasta el nivel requerido para mejorar la operación.
17. Con frecuencia se ha dicho que para lograr un manejo eficiente del agua es esencial contar con dispositivos aforadores. Sin embargo, éstos deberán adaptarse a las complejidades de la operación de un sistema de irrigación; ya que los aforos que se tienen que hacer son muy diferentes en relación a los que se hacen en proyectos de investigación hidrológica o hidráulica. El uso correcto de dispositivos de aforo convencionales, requiere de una buena capacitación y constancia de los operadores, a pesar de lo cual no se puede evitar que las estructuras de control funcionen mal. Un enfoque alternativo puede ser el uso de un sistema de autocontrol del cual hablaremos más adelante.
18. Los procesos de planeación, diseño y construcción, deben producir un sistema y las condiciones necesarias que permitan un manejo efectivo del mismo.
19. En la PARTE I, se hace una revisión de los aspectos más importantes relacionados con la planeación y el diseño de sistemas de irrigación, que deberían tomarse en cuenta para mejorar su operación y su administración.

20. Se incluye también un repaso general de los problemas relacionados con la distribución del agua y con los métodos de control, que se describirán más adelante.
21. En la PARTE II, se revisan los enfoques conceptuales del manejo de los recursos hidráulicos, tanto para proyectos en pequeña escala como para proyectos convencionales de gran escala.
22. En la PARTE III, se define el problema hidráulico básico de control de los canales de riego.
23. En las PARTES IV y V, se hace una presentación de los métodos modernos de control remoto para los sistemas de irrigación a nivel local, localizado y centralizado.
24. En la PARTE VI se estudian los equipos de control disponibles en sistemas de irrigación.
25. Y en la PARTE VII se examinan los problemas relacionados con la elección de los métodos más apropiados de operación, así como de la tecnología asociada a éstos, tanto para la construcción de nuevos proyectos como para la modernización de los sistemas ya existentes.
26. Volvamos ahora nuestra atención, dentro de este repaso general, a la necesidad de optimizar los sistemas de irrigación, tanto en términos de demanda como de abastecimiento del agua.
27. Empecemos por definir cuáles son los objetivos que deben cumplir los sistemas de irrigación, intentando conciliar tres puntos de vista diferentes. Primero: los agricultores; segundo: las autoridades responsables de la operación de los sistemas, y tercero: el pais.
28. La primera preocupación del agricultor es producir alimentos suficientes ya sea para su subsistencia o para aumentar su ingreso familiar.

29. Desde el punto de vista del agricultor, la forma más deseable de entrega de agua es la "demanda libre". De esta manera, puede programar sus riegos considerando las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y la lluvia.
30. También puede combinar el riego con otras prácticas agrícolas, como la preparación de la tierra...
31. ... o bien, la aplicación de herbicidas para el control de malas hierbas. Esta flexibilidad en el suministro del agua permite al agricultor, obtener rendimientos máximos.
32. Para lograr estos rendimientos máximos, el agricultor requiere flexibilidad en la distribución del agua en términos de frecuencia, cantidad y duración.
33. La frecuencia de riego debe programarse en forma flexible, para evitar al cultivo esfuerzos por falta de humedad y para no interferir con otras actividades.
34. La proporción de agua entregada determina la uniformidad de su distribución y el uso eficiente de la mano de obra.
35. La duración o periodo de tiempo de aplicación del agua de riego, es también crítico. Aplicar más agua de la necesaria produce percolación abajo de la zona radicular, y contribuye a la lixiviación de los fertilizantes, causando además, problemas de drenaje.
36. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas de irrigación, los agricultores no se benefician con la flexibilidad que proporciona la demanda libre. Muchos de ellos se preocupan por la frecuencia con que reciben el agua; la cantidad de agua que reciben y por el tiempo que la van a recibir.
37. Veamos ahora los objetivos desde el punto de vista de las autoridades responsables del manejo del sistema de irrigación, que puede ser una asociación de agricultores o un organismo gubernamental.

38. Los objetivos de las autoridades en términos generales consideran: una distribución equitativa del agua, procedimientos sencillos de operación y una distribución eficiente donde el agua es escasa (esto puede causar conflicto con los intereses individuales de los agricultores).
39. Cuando el agua es limitada, y este es el caso más frecuente, las autoridades tienen que evitar que los usuarios compitan entre sí para favorecer sus propios intereses. Esto requiere que se hagan valer los reglamentos y disposiciones que norman la distribución del agua.
40. Por una parte, en sociedades indígenas con una larga tradición en sistemas de irrigación equitativos -fundados en el respeto a los derechos establecidos para el uso del agua que incluso son, hasta cierto punto flexibles en obras de pequeña escala- tienen como base normas culturales de distribución y reparto del agua, ampliamente aceptadas.
41. Por otra parte, si el sistema de irrigación se realiza mediante la intervención de un organismo externo, a menudo impone a los grupos de agricultores las prácticas a seguir para asegurar una distribución equitativa, mediante reglas de operación sencillas, pero rígidas. La autonomía del agricultor se ve así limitada mediante un sistema de control centralizado de entrega del agua. Un ejemplo puede ser el programa semanal de riego, fijado por las autoridades.
42. Las autoridades a cargo de un sistema de irrigación, tienen asimismo que confrontar problemas de limitaciones financieras y de personal para su operación. Por ello, deberán diseñarse estructuras de control que reduzcan al mínimo las intervenciones del personal.
43. Más aún, la operación de estas estructuras debe ser sencilla -aunque precisa- para reducir al mínimo el nivel de capacitación técnica que requieran los operadores de los canales de riego. Esto redundará, en términos generales, en una distribución más eficiente.
44. Sin embargo, son muchos los proyectos en los cuales esta reducción de intervenciones y de capacitación del personal de operación, no fue tomada en cuenta en la etapa de diseño. Como resultado, muchas estructuras son poco confiables y requieren de ajustes frecuentes para funcionar bien...

45. ... y su operación es compleja y no bien comprendida por los operadores. Los intentos para mejorar el funcionamiento de los sistemas de irrigación, mediante el incremento de personal y su capacitación con frecuencia no son efectivos.
46. Desde el punto de vista de los objetivos económicos del país, un sistema de irrigación busca aumentar la producción de alimentos, generar empleos y divisas o ayudar a reducir la pobreza en las áreas rurales. Esto último puede lograrse mediante la adopción de una política de irrigación extensiva, distribuyendo el agua de tal manera, que beneficie al mayor número posible de agricultores. En algunos países, este enfoque ha tenido un efecto notable sobre las disposiciones que rigen las actividades de distribución del agua así como también sobre el diseño de sistemas.
47. También, desde el punto de vista del país, es importante que al planearse un sistema de irrigación, se considere el efecto que tendrá sobre el medio ambiente. El objetivo es proporcionar un funcionamiento permanente del sistema de irrigación, sin que genere efectos indeseables sobre el medio ambiente como: empantanamiento de los suelos, agotamiento de mantos acuíferos subterráneos y salinización.
48. En resumen, hemos visto que un proyecto de irrigación debe cumplir con una amplia gama de objetivos, algunos de los cuales pueden no ser siempre compatibles. En particular, los intereses individuales de los agricultores, que con todo derecho se preocupan por la cantidad de agua que se les asigna y por la flexibilidad del suministro del líquido, que pueden no estar de acuerdo con los intereses de la comunidad en general.
49. Una vez estudiados los aspectos de manejo y operación desde el punto de vista de la demanda, veamos el problema relacionado con el suministro. El agua no es un "bien" o "producto" como lo son otros insumos para la agricultura; se trata de un recurso natural que reúne características diferentes y que es difícil de manejar.
50. Debido a la variabilidad del agua en el tiempo y en el espacio, es difícil usarla eficientemente.

51. Debido a su fluidez, resulta difícil su medición y su distribución.
52. Las variaciones diarias y estacionales en el caudal de las corrientes, reflejan en parte, la variabilidad de la precipitación pluvial sobre las cuencas de captación. Pero, salvo en pocas excepciones, el patrón de suministro de agua no se ajusta al patrón de la demanda. Por ello, es difícil lograr hacer un uso eficiente del líquido y una irrigación intensiva durante todo el año.
53. Una solución al problema del riego interestacional son las presas de almacenamiento, siempre y cuando éstas sean factibles tanto desde el punto de vista técnico como económico.
54. Sin embargo, son muchos los sistemas de irrigación que aún tienen que depender de caudales de ríos no regulados o semi regulados como fuente de aprovisionamiento.
55. La imposibilidad de predecir la precipitación pluvial que tendrá lugar en un área de riego, hace aún más compleja la operación de los grandes sistemas de irrigación. Por ejemplo: ¿Cómo podemos responder al cierre repentino de las bocatomas de los usuarios, sin desperdiciar el agua que ya está corriendo en los canales y hacia el sistema de drenaje?
56. El reto consiste entonces en repartir el agua en forma equitativa, eficiente, confiable y oportuna, a la vez que minimizar los costos de operación y de personal. Se admite que es necesario sacrificar algunos de estos objetivos a favor de los otros.
57. La última parte de este repaso general, será una breve descripción de algunos de los sistemas que han sido desarrollados en la actualidad. Hace cien años, el diseño de sistemas modernos de irrigación era una disciplina que aún estaba en su infancia. Los sistemas se diseñaron buscando alcanzar objetivos bastante limitados, por lo que no son capaces de satisfacer las necesidades de la agricultura moderna. Por lo tanto, las limitaciones técnicas de estos sistemas, frecuentemente reducen las posibilidades de mejorar su funcionamiento mediante una mejor administración.

58. Por ejemplo, el sistema de riego de la cuenca del Indo fue concebido en 1870 para funcionar bajo condiciones y con objetivos que son muy diferentes de los actuales. Este sistema se diseñó para permitir una distribución justa del agua, se opera con poco personal, pero el suministro de agua ofrece muy poca flexibilidad. Los agricultores se ven entonces obligados a ajustar la programación de sus cultivos de la mejor manera que pueden, para aprovechar al máximo el volumen de agua que reciben.
59. Otros sistemas se diseñaron para lograr un suministro de agua justo y flexible, y para satisfacer las necesidades de riego. Su operación eficiente se basa en un gran número de empleados dedicados y capacitados, con sistemas rápidos de comunicación y transportación adecuada. Si se cumplen todas estas condiciones, estos sistemas funcionan bien. Sin embargo, en la práctica, estos requisitos de operación con frecuencia no se satisfacen, lo cual limita el funcionamiento del sistema.
60. Una solución a los problemas que acabamos de considerar, podría obtenerse utilizando los conceptos modernos de regulación de canales y dispositivos de control que se han desarrollado durante los últimos 50 años, y que actualmente se usan con éxito en muchos países.
61. Los sistemas de irrigación que operan con base en los más modernos conceptos de regulación de canales, proporcionan mejor servicio, al mismo tiempo que su operación es más sencilla y requieren de menos personal.
62. La escasez de personal calificado que existe en ciertos países y el alto costo de la mano de obra en otros, son los principales factores limitantes para la operación de sistemas convencionales de irrigación que requieren de ajustes frecuentes. Por ello, el objetivo principal al desarrollar conceptos modernos de regulación y técnicas para el control de sistemas de irrigación, ha sido el de simplificar considerablemente la operación.
63. Estos diseños simplificados pueden mejorar el suministro de agua a los agricultores.
64. En la misma forma en que lo hacen otros servicios públicos como el suministro de electricidad o de agua potable, es necesario que los sistemas de irrigación continúen

funcionando sin requerir de una atención constante a cada uno de sus componentes, y sin necesidad de contar con una gran cantidad de personal altamente capacitado.

65. Por ejemplo, los dispositivos que se han desarrollado con base en energía eléctrica o hidráulica, hacen posible el control automático del tirante del agua en los canales.
66. Otros dispositivos tienen características adicionales que son importantes para regular el gasto. Existen compuertas que permiten hacer un ajuste automático del gasto con la demanda que se presente en cada uno de los puntos de control ubicados a lo largo del canal. Esto elimina la necesidad de preparar por adelantado un elaborado programa de operación que reduciría la flexibilidad de éste.
67. Otro ejemplo es el limitador de caudal que, en forma automática, derrama cualquier gasto que exceda la capacidad de tránsito del canal donde la sección transversal es reducida...
68. ... y existen módulos que mantienen un gasto casi constante en cualquier punto de derivación, incluyendo las tomas granjas de los agricultores.
69. La variedad de opciones que ofrece la tecnología moderna para mejorar el funcionamiento de los sistemas de irrigación, se discutirá en las PARTES IV, V y VI, que incluyen desde dispositivos muy sencillos que se fundamentan en principios elementales de hidráulica...
70. ... hasta sistemas centralizados de control remoto de alta tecnología.
71. Estos dispositivos de control tienen varias ventajas: un aprovechamiento más eficiente de los recursos hidráulicos limitados; mejor servicio a los agricultores; costos de operación bajos con un mínimo de mano de obra; armonía entre agricultores y operadores; la posibilidad de facturación volumétrica por concepto de servicio de riego y, en algunos sistemas, una reducción considerable de costos de bombeo. Se tienen también menos problemas ecológicos como salinidad y terrenos anegados.

72. En la mayoría de los casos, el costo total de un sistema moderno de irrigación es aproximadamente de 5 a 10% superior al costo de uno convencional que tenga las mismas capacidades de canales de riego. Sin embargo, los diseños modernos ofrecen ventajas sustanciales en términos de producción agrícola y ahorro en costos de operación que sobrepasan al incremento marginal de costos de capital.
73. Como veremos más adelante, existe una gran variedad de enfoques para el diseño y administración de sistemas de irrigación. Pero la elección del que se utilizará en proyectos nuevos o para mejorar sistemas ya existentes, deberá hacerse muy cuidadosamente. Existen diferentes niveles de eficiencia, equidad, complejidad de diseño, y requisitos de personal de operación en los sistemas de riego. Cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas diferentes, distintos riesgos y conflictos entre agricultores, y diversas necesidades financieras y de personal para su operación y mantenimiento.
74. En algunos casos, la tecnología más adecuada es la más rudimentaria.
75. Es importante que los proyectistas evalúen y seleccionen el enfoque más adecuado y la tecnología asociada desde las primeras etapas de desarrollo del proyecto.
76. Los proyectistas deben estar conscientes de que un manejo efectivo de los sistemas de irrigación no es algo que se logra después de la construcción, sino que debe estar integrado en los procesos de planeación, diseño y construcción.
77. Algunos países han dirigido sus inversiones a proyectos de irrigación que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos, mediante la modernización de los sistemas de irrigación ya existentes. Pero cada año se continúan construyendo otros sistemas de irrigación con base en conceptos convencionales con pequeños pero necesarios ajustes en sus estructuras.
78. La variedad de conceptos y tecnologías avanzadas es poco conocida y no siempre bien comprendida. Por lo tanto, es importante que la información sobre estos conceptos modernos, llegue a la comunidad mundial que trabaja en el campo de la irrigación. Existe la urgente necesidad de

diseñar y operar sistemas de irrigación que logren aprovechar, de manera más eficiente, los limitados recursos hidráulicos de la tierra. Han surgido muchas opciones que permiten satisfacer toda una gama de condiciones físicas, sociales y económicas...

79. ... y permiten mejorar el funcionamiento de los sistemas de irrigación, lo cual contribuirá a incrementar la producción de alimentos y a diversificar cultivos para alimentar a los pueblos de todo el mundo.

80. FIN DE LA PARTE I

81. PARTE II: ANTIGUOS ENFOQUES CONCEPTUALES.

82. Esta parte se ocupa de los proyectos tradicionales de riego a pequeña escala y de los proyectos convencionales a gran escala. Revisaremos los principios de la distribución del agua en sistemas tradicionales de irrigación; discutiremos las deficiencias de estos principios cuando se aplicaron en algunos sistemas de gran escala, a fines del siglo XIX, y por último, analizaremos los problemas de la operación en los sistemas de gran escala equipados con un gran número de estructuras controladas manualmente.
83. La irrigación tradicional tiene sus raíces muy atrás en la historia; estaba constituida por proyectos de pequeña escala, generalmente con menos de 1,000 hectáreas, que construían y mantenían las comunidades locales con muy poco o ningún apoyo gubernamental.
84. Aunque actualmente los proyectos tradicionales de riego representan un pequeño porcentaje (probablemente menos del 10 por ciento) de los 275 millones de hectáreas que se encuentran bajo riego en todo el mundo, aún desempeñan un papel importante en países tales como Indonesia, Nepal, Marruecos, Perú, Afganistán y España.
85. En estos sistemas, las costumbres locales de asignación y distribución del agua se han desarrollado en el transcurso del tiempo y están bien adaptadas a las condiciones ecológicas y sociológicas locales.
86. Estos sistemas son muy versátiles y permiten compensar las variaciones en el suministro natural del agua.
87. Existe también gran flexibilidad en la distribución del agua entre los miembros de las sociedades tradicionales, por ejemplo, a través de cambios en el suministro de agua, de acuerdo con la estación del año.
88. Aún cuando el término "costumbres locales" en la administración del agua puede ser entendido por algunas personas como primitivismo, estas reglas son precisas, refinadas y con frecuencia su complejidad aumenta con el

grado de escasez del agua. La definición y aplicación de las reglas podría ser tema de prolongados debates entre los miembros de las asociaciones de agricultores de riego.

89. Los factores clave para el éxito de los sistemas tradicionales son: la organización de las comunidades locales, el tamaño pequeño de los sistemas, y un suministro de agua confiable, o por lo menos predecible en la toma.
90. Revisemos las técnicas básicas de la distribución del agua en la irrigación tradicional. Estas son: suministro a discreción; tiempo compartido y caudal comprometido o, en otros términos, la demanda, el tandeo y la partición.
91. Donde no hay problemas para el suministro de agua, los agricultores tienen libertad para usarla a discreción. La práctica de demanda libre es común en los países tropicales e incluso en algunos países semiáridos durante la estación de lluvias, pero en general se usa poco en los sistemas a gran escala. Los agricultores adoptan la irrigación continua o intermitente dependiendo de sus cultivos. Por lo tanto, el regador tiene la libertad de ajustar el riego de acuerdo con las necesidades del cultivo, con las características del suelo y combinar el riego con otras actividades agrícolas.
92. Si el agua es escasa, se usa el tiempo compartido o el tandeo para lograr una distribución equitativa. Donde el gasto es predecible y no muy variable en el mediano plazo, digamos en unas cuantas semanas, se practica comúnmente la rotación de los gastos entre los agricultores o grupos de ellos.
93. Existen muchas formas de arreglos para llevar a cabo la rotación, dependiendo de tres variables: el gasto, la duración y la frecuencia. Estas pueden modificarse con el tiempo, dependiendo del suministro del agua y de las necesidades de los cultivos.
94. Cuando el suministro es impredecible, una práctica común es dividir el gasto -y no el tiempo- en proporciones fijas que son socialmente aceptadas y con frecuencia predeterminadas por los derechos de aguas. Este principio de partición o

división proporcional se usa en muchos sistemas tradicionales de irrigación, por ejemplo, en Ball, Nepal, España, Africa del Norte y América Latina.

95. En la práctica, la división del gasto y el tiempo compartido se combinan bajo el mismo esquema.
96. Para ilustrar la variedad de enfoques en la distribución del agua, analicemos las principales características de tres sistemas tradicionales de España oriental: Valencia, Alicante y Murcia.
97. En el proyecto de Valencia, de 16,000 hectáreas, los procedimientos de operación consideran diferentes reglas para tres niveles de disponibilidad del agua: abundante, escasa y sequía extraordinaria.
98. Durante los periodos de escasez, cada uno de los siete canales principales puede extraer del río sólo su volumen de agua asignado. El agua se distribuye entonces mediante canales repartidores en muchas corrientes.
99. Los agricultores que se benefician de un mismo canal, toman el agua por turnos. Por lo tanto, la frecuencia no está programada y la duración de cada riego queda a discreción de cada agricultor. Sin embargo, en periodos de sequía, se imponen restricciones y, en caso extremo, se asignan prioridades para ciertos cultivos.
100. Las disputas o reclamaciones entre los agricultores son resueltas por un tribunal, que se reúne cada jueves desde hace casi 1,000 años.
101. En el sistema de Murcia, los canales principales reciben suministros fijos de un gasto variable del río, pero a cada agricultor se le asigna un periodo de tiempo, durante el cual puede regar. El gasto es variable, pero la frecuencia y la duración de los riegos son fijas. En estos dos casos el derecho al agua es inseparable de la tierra.
102. En el sistema de Alicante, de 37,000 hectáreas, el régimen sumamente variable del río, se reguló mediante la construcción, de una gran presa en el siglo XVI.

103. A diferencia de los otros dos sistemas, en este se entrega un gasto fijo de 150 litros por segundo. Sin embargo, la duración y la frecuencia las determina el agricultor, que compra o vende su cuota de agua semanalmente en el mercado. Por lo tanto, los derechos del agua están divorciados de la tierra.
104. La distribución del agua por caudal compartido es un método preciso e igualitario. La operación según esta técnica, es automática. Sólo requiere de la intervención humana para evitar actividades no autorizadas, las que, de presentarse, se castigan con severidad. En época de escasez, los volúmenes son distribuidos proporcionalmente entre todos los regadores. La interferencia con el sistema de distribución es claramente visible, al contrario de lo que sucede en los sistemas con estructuras de compuertas.
105. En contraste, la dotación a base de tiempo requiere canaleros y supervisores para abrir o cerrar las tomas y de un fuerte apego a las reglas por parte de todos los agricultores.
106. Resumiendo, en los tres ejemplos españoles de sistemas de irrigación tradicionales, los miembros de las asociaciones han desarrollado diferentes reglas para programar los riegos. En los casos de Valencia y Murcia, en los que el uso del agua no está reglamentado, los agricultores usan dos sistemas diferentes para resolver el problema de una distribución incierta. En el caso de Alicante, el agua regulada es una mercancía vendible.
107. A continuación dirigiremos nuestra atención a la administración del agua en sistemas convencionales en gran escala.
108. Mediante el proceso de transferencia de tecnología, algunos de los conceptos antiguos básicos de la irrigación tradicional, se aplicaron en el siglo XIX, a los sistemas de irrigación a gran escala. Sus principios de organización están aún vigentes.
109. Consideremos, por ejemplo, el caso de sistemas construidos en la cuenca del Indo entre 1870 y 1880 para proporcionar agua al mayor número de agricultores. El diseño

y el trazo del sistema de canales se realizó, principalmente, para ajustarse a los patrones de suministro de agua de ríos no regulados.

110. El concepto básico del diseño fue proporcionar una distribución equitativa de agua con la mínima intervención humana y bajos costos de operación, mediante un grupo pequeño de personal con medios limitados y una comunicación rápida para cubrir grandes distancias. Esto es sencillo pero efectivo.
111. El sistema depende de una combinación de gasto y tiempo compartidos. Los canales de distribución se operan según un sistema de "cerrado" o "abierto", debido a la rotación del gasto disponible en el sistema principal que fluye continuamente. Las tomas sin compuertas, descargan el agua en proporción fija para distribuir el gasto cuando el sistema distribuidor está "abierto". Cuando está "abierto", los conductos de agua permanecen automáticamente "abiertos" y reciben una proporción fija del gasto. La distribución a los agricultores que utilizan el mismo canal, se hace según un sistema de rotación denominado "Warabundi". El tiempo asignado a cada agricultor es proporcional al tamaño de la superficie que posee.
112. No obstante lo efectivo y equitativo de este sistema, no está relacionado directamente con las necesidades de los cultivos. Corresponde al agricultor programar sus cultivos y sus riegos, ajustándolos a un gasto fijo y en tiempos predeterminados. Generalmente, el agricultor aplica deliberadamente poca agua para elevar al máximo su producción por unidad de agua y no por unidad de superficie.
113. La rigidez de este método que asigna un gasto fijo es una limitante para el manejo moderno del agua a nivel de predio. El dramático aumento en la extracción de agua subterránea de la cuenca del Indo durante las últimas décadas, fue la respuesta de los agricultores a sus necesidades de flexibilidad y de agua adicional.
114. En este caso, el diseño se basó en los requerimientos hidráulicos para evitar azolves en los sistemas de canales y así reducir al mínimo la mano de obra para la operación.

115. El mismo enfoque se adoptó en Egipto para los canales principales y laterales del valle del Nilo, con diferencias importantes en el diseño hidráulico de la red de canales y en la organización para la distribución del agua.
116. Los niveles del agua en la mayoría de los canales son más bajos que las áreas de riego. El agricultor o grupos de ellos tienen la libertad de bombear en cualquier momento, cuando el canal distribuidor está "abierto". Con una mayor autonomía que sus colegas del Punjab, el agricultor Egipcio cuenta con un gran potencial para la producción, pero el bombeo se suma a sus costos de producción.
117. La mayor parte del bombeo aún se efectúa mediante el uso de energía animal y el gasto que entra a los canales es, en general, insuficiente para el riego. Este tipo de bombeo limita el volumen de agua que el agricultor puede extraer, por lo tanto, la desigualdad en la asignación de cuotas de riego no es tan severa como en algunos proyectos por gravedad.
118. Como el bombeo se suspende durante la noche, el agua que corre por los canales de riego escurre al sistema de drenaje, y es reutilizada aguas abajo.
119. En la depresión Fayoum, en Egipto, precisamente a un lado del valle del Nilo, el agua se suministra por gravedad y se usa comúnmente el método de partición.
120. Los ejemplos de la cuenca del Indo y de Egipto, ilustran el hecho de que el diseño de grandes sistemas no puede ser una simple extrapolación del diseño y de las normas de operación de los sistemas tradicionales. El tamaño del sistema da otra dimensión al problema por las siguientes razones: el gran número de agricultores que deben ser atendidos; el problema de comunicación en grandes distancias, y el manejo del agua que corre por los canales cuando la demanda es variable, por ejemplo, cuando el riego no se practica por la noche, o durante las fuertes lluvias en los países tropicales. En los sistemas a gran escala, puede lograrse la equidad mediante un diseño sencillo que puede sin embargo, no ser ni eficiente ni flexible.

121. A mediados del siglo XX se desarrolló el diseño de proyectos de gran escala. La construcción de varias presas de almacenamiento mejoró la disponibilidad de los recursos hidráulicos. Los diseños reflejaron también una mejor comprensión de la relación agua-suelo-planta. El objetivo fue suministrar agua en forma no sólo equitativa sino flexible y que se ajustara a las necesidades reales de riego.
122. Estas grandes sistemas de riego fueron construidos con gran número de compuertas transversales reguladoras y de tomas para controlar los caudales y niveles del agua en cada canal del sistema. En teoría, estos sistemas deberían satisfacer todos los criterios para el éxito del riego, y sin embargo, en la práctica, presentan dificultades de operación.
123. Estas dificultades son originadas por varias causas. Por ejemplo, el tiempo que se tarda el agua en recorrer grandes distancias y la poca exactitud que se obtiene con las estructuras ajustables de control, pueden dar lugar a variaciones en los niveles del agua y de los caudales difíciles de predecir. Como resultado, el suministro del agua a los agricultores situados al final es con frecuencia incierto.
124. Estos sistemas convencionales a gran escala, dotados de compuertas, son también difíciles de operar y requieren de mucho personal competente, lo que origina: baja eficiencia en el uso del agua, bajos rendimientos, baja intensidad de cultivos, inequidad, y hostilidad entre los agricultores y los encargados de su administración. Sin embargo, existen algunos sistemas de este tipo bien administrados. Tal es el caso de algunos localizados en la región noroccidental de México. En resumen, mejorar la operación mediante sistemas complicados, con muchos puntos de aforo y de control, puede crear deficiencias.
125. Una solución al problema de las entregas de agua rígidas o inciertas, ha sido la construcción de pequeños almacenamientos en los predios de los agricultores o de grupos de ellos. Estos embalses proporcionan flexibilidad en el gasto, en la frecuencia y en la duración.

126. Por ejemplo, pequeños estanques de almacenamiento hacen posible el riego por aspersión en sistemas por gravedad. Sin embargo, el uso de dichos estanques no es práctico en superficies pequeñas y en terrenos planos.

127. En el Sudán, los proyectos a gran escala tienen una característica interesante. Mientras que el sistema principal cuenta con poca capacidad de control, los canales terciarios son de gran tamaño y sirven como estanques terminales para el almacenamiento diario del agua.

128. En resumen, hemos visto que muchos sistemas convencionales de gran escala no están cumpliendo con los objetivos de la irrigación moderna: alta eficiencia, distribución equitativa y oportuna del agua a los agricultores, simplicidad, y bajo costo de operación. En las siguientes partes se verá cómo lograr estos objetivos.

129. FIN DE LA PARTE II.

130. PARTE III: EL CONTROL HIDRAULICO EN CANALES.

131. La irrigación es el arte de mejorar la distribución natural del agua. Esto implica el almacenamiento, la conducción, la distribución y la aplicación del agua a los campos de cultivo. El aspecto más crítico del manejo de los sistemas de irrigación es la conducción del agua por canales abiertos, tema del que se ocupa esta parte.

132. Específicamente lo que vamos a revisar es la formulación, en términos de Ingeniería, de los objetivos de los sistemas modernos de irrigación. Estudiaremos primero los dos aspectos básicos del control del agua en canales de riego: el gasto y el tirante; después describiremos los métodos para lograr este control bajo condiciones de gasto variable.

133. El Ingeniero en hidráulica juega un papel muy importante en el diseño de sistemas de irrigación. Su tarea es doble ya que, primero, tiene que diseñar la compleja red de canales de distribución del agua desde el origen hasta los predios y segundo, asegurar un control permanente y efectivo del agua a través de todo el sistema.

134. De la misma forma en que el Ingeniero electricista controla el voltaje y el amperaje, el Ingeniero en hidráulica controla, por un lado, la presión y el flujo en un sistema de tuberías; y por el otro, el tirante del agua y el gasto en un sistema de canales abiertos. En esto consiste el doble problema de la hidráulica de canales abiertos.

135. Antes que nada, veamos cuáles son las razones que obligan a medir el gasto y el tirante del agua en un canal.

136. Existen cuatro razones para controlar el gasto en un sistema de canales de riego: satisfacer las necesidades de agua de los cultivos para obtener una producción óptima; ahorrar agua; seguridad en la operación y recuperación de los costos de operación. Veremos más adelante cada una de ellas en detalle.

137. Los requerimientos de agua varían con el tipo de cultivo, su etapa de desarrollo, la época del año y los cambios climatológicos diarios, especialmente la precipitación pluvial. Tanto la escasez como el exceso de agua afectan el rendimiento de los cultivos, sobre todo en ciertas etapas

críticas, como la floración, en el caso del arroz. El suministro de agua en respuesta a esta demanda, debe de ser inmediato y preciso.

138. En países de climas áridos y semiáridos, donde el agua es escasa, el ahorro de agua adquiere especial importancia. Aún en los países tropicales, la falta de agua puede limitar el crecimiento de la agricultura de riego. Por lo tanto se deben diseñar sistemas que puedan ajustarse a cualquier disminución brusca del gasto, como la que tiene lugar por las noches o durante un aguacero repentino.
139. Una operación segura requiere que el gasto que entra a un canal nunca sea superior a su capacidad de conducción, ya que en términos generales, ésta tiende a disminuir a medida que el canal se extiende aguas abajo. Aunque es posible evitar que los canales se desborden, mediante estructuras de alivio, que permiten que el agua excedente escurra al sistema de drenaje, ésto constituye una pérdida lamentable del preclado líquido.
140. La cuarta razón que obliga a ejercer un control preciso del gasto, es la necesidad de contar con una base para la recuperación de costos. Con ello es posible cobrarle a los agricultores tarifas por derechos de agua, basadas en el volumen utilizado.
141. Volvamos ahora nuestra atención al control del nivel del agua.
142. Es muy importante controlar el tirante del agua de un canal de riego y los límites aceptables de variación no son muy amplios. Hay cuatro razones para controlar el tirante: dominar el área servida por gravedad; proteger los canales contra deterioros; contar con una operación segura en los canales y obtener un buen control del gasto en la bocatoma.
143. Entre más alto sea el tirante en un canal, mayor será el área que se puede regar por gravedad, sin bombeo...
144. ...consideración muy importante para los agricultores.

145. Recordemos que en algunos sistemas convencionales, los canales se operan con base en un sistema rígido de "abierto-cerrado" y siempre se encuentran a su capacidad total para asegurar un nivel constante en cada bocatoma.
146. Sin embargo, para satisfacer las necesidades de los sistemas modernos de irrigación, es necesario que los canales funcionen bajo condiciones de gasto variable, ya que existe una relación directa entre el gasto y el tirante. En condiciones de gasto constante se hace necesario tomar medidas para aumentar el tirante en el canal por medios artificiales..
147. Otras de las razones para controlar el tirante del agua en los canales son: obtener seguridad de operación y proteger la red de distribución contra el deterioro. El nivel de agua no deberá sobrepasar el límite superior del tirante normal de operación, para evitar que el agua se desborde y se pierda a través de los aliviaderos.
148. Pero si el nivel de agua baja demasiado y muy rápido, la contrapresión ejercida sobre el revestimiento de los canales, así como, la inestabilidad de los taludes en suelos difíciles y con fuertes pendientes, pueden causar deterioros en la red de distribución. Por lo tanto, es importante, mantener el nivel del tirante entre un máximo que se impone por razones de seguridad, y un mínimo que se requiere para aprovechar la fuerza de la gravedad.
149. Mantener el tirante del agua suficientemente alto, evita la erosión que causarían las lluvias al caer en un canal de tierra vacío.
150. La cuarta razón para controlar las variaciones del tirante en un canal, es la de facilitar el control del gasto y la medición del agua en las tomas.
151. El gasto que pasa por una bocatoma, ya sea un orificio o un vertedor, depende de la carga hidráulica aguas arriba; por lo tanto, una responsabilidad muy importante del ingeniero de diseño es la de reducir las variaciones de carga en las tomas de los canales para facilitar el control del gasto.

152. El control del tirante es un concepto básico que ya formaba parte de los sistemas de irrigación tradicionales. Los agricultores siempre han sabido cómo fabricar represas en sus arroyos y canales, cuando ha sido necesario.
153. El mismo concepto se aplica al hacer el diseño más sencillo de nuevos canales; el tirante se controla mediante reguladores transversales (en ocasiones llamados estructuras de retención) que pueden ser de complejidad variable. Las represas transversales pueden consistir de vertedores sencillos,
154. O represas transversales con compuertas.
155. O una combinación de ambos.
156. Los agricultores son muy hábiles para corregir las deficiencias de diseño en los sistemas que no han construido.
157. Al represar un canal con estructuras transversales, se ocasiona una variación en el perfil de la superficie del agua, con la descarga que tiene lugar a partir de una línea que corre paralela al fondo del canal, con gasto máximo, hasta otra línea que corre en dirección horizontal, con gasto nulo. El volumen contenido entre estos dos perfiles se llama volumen de cuña.
158. En otras palabras, si un sistema va a funcionar continuamente con variaciones en el gasto, hay que diseñarlo dividiendo el canal en estanques sucesivos y ubicando las tomas de tal manera que el diferencial en las variaciones del tirante se mantenga dentro de ciertos límites.
159. El nivel del agua de cada estanque deberá mantenerse dentro de los niveles mínimo y máximo, aunque el perfil de superficie puede adoptar cualquier posición dentro de las dos líneas extremas.
160. Las modernas tecnologías que actualmente están disponibles han abierto el camino, permitiendo la aplicación de métodos de control del tirante, que permitan flexibilidad en la distribución del agua.

161. Haremos un repaso de cuatro métodos básicos para el control del nivel del tirante: aguas arriba, aguas abajo, de volumen constante y una variante del método de control aguas abajo.
162. Se pueden colocar puntos de control inmediatamente aguas arriba o aguas abajo de cada represa, mediante el uso de compuertas que mantienen el tirante del agua al nivel deseado.
163. Con el método de control aguas arriba, la berma, es decir, la parte superior del canal, se define tomando en cuenta las condiciones de gasto máximo. La berma, normalmente corre paralela al fondo del canal. En el método de control aguas abajo, la berma se define tomando en cuenta condiciones de gasto nulo y tiene que correr en dirección horizontal.
164. El control ubicado aguas abajo, por lo tanto puede requerir de la construcción de obras de Ingeniería civil adicionales en las secciones de relleno de los terrapienes del canal.
165. El tirante normal de operación puede ser fijo o incluso ajustable. Esto último, da lugar a cierta flexibilidad en la operación de canales que conducen aguas cargadas de cienos. Esto evita la sedimentación en los periodos en que la demanda es baja; por ejemplo, en las primeras etapas de operación de un sistema de irrigación.
166. El nivel normal en cualquier sección, puede encontrarse también entre dos represas. Cuando el punto de control está aproximadamente a la mitad de un estanque, el método utilizado es el de volumen constante.
167. El cuarto método es una variante del control aguas abajo. Según este método, el punto de control puede ubicarse en el extremo aguas abajo de una represa controlada por una compuerta colocada aguas arriba. En esta variante del control aguas abajo, no existe el costo adicional de terrapienes, ya que es posible diseñar la berma para que corra en dirección paralela al fondo del canal.
168. Acabamos de revisar los cuatro conceptos de la operación de los canales de riego: el control aguas arriba, el control aguas abajo, el volumen constante y una variante del control aguas abajo.

169. Ahora examinaremos las relaciones físicas entre los puntos de nivel normal y las compuertas que permiten asegurar esos niveles normales. Podemos definir tres métodos de control: local, remoto localizado y remoto centralizado.
170. En el método de control local, el tirante normal se establece inmediatamente junto a la compuerta.
171. Para un control remoto localizado, el punto de tirante normal puede estar ubicado en cualquier sitio a lo largo de un estanque controlado por una compuerta.
172. El control remoto centralizado, requiere que la información sobre demanda, tirante, posición de las compuertas y volumen de agua almacenado, se transmita a un centro de operaciones que controla al canal en toda su extensión.
173. En las dos partes siguientes examinaremos cómo se opera un sistema de irrigación mediante controles locales, controles remotos localizados y controles remotos centralizados.
174. FIN DE LA PARTE III.

175. PARTE IV: OPERACION DE SISTEMAS CON CONTROLES LOCALES Y REMOTOS.

176. En la PARTE III, examinamos el doble problema hidráulico de controlar el gasto y el tirante en un canal de riego. En esta parte, dirigiremos nuestra atención a la operación del sistema de irrigación, compuesto de un canal principal y una compleja red de canales secundarios y terciarios.

177. En la etapa de planeación de un sistema de irrigación hay que decidir la flexibilidad que se les dará a los agricultores. ¿Deberá dárseles autorización para tomar agua libremente?, ¿con o sin una dotación anual?, ¿se deberá diseñar el sistema de tal manera que los agricultores puedan solicitar cambios de gasto, duración o frecuencia del riego? o, ¿puede lograrse todo esto sin afectar el suministro de agua de sus vecinos?

178. En esta parte, veremos cómo abordar estos problemas cuando se diseñan sistemas de irrigación por gravedad, bajo controles locales o remotos localizados.

179. Hasta ahora, no existen ejemplos de grandes sistemas de irrigación en los que los agricultores tengan una completa y constante autonomía individual en el uso del agua, a no ser que se apropien de ella en forma ilegal. Las autoridades tienen que ejercer algún control sobre la distribución del agua; por lo tanto, es necesario que exista una buena coordinación entre los agricultores y las autoridades.

180. En los sistemas que otorgan mayor grado de flexibilidad, los agricultores tienen que solicitar con uno o más días de anticipación la cantidad de agua que necesitan y la duración de cada periodo de riego. Esto se denomina demanda convenida y permite a los agricultores ejercer cierto grado de control sobre el suministro del agua, por lo que estos sistemas se han considerado como orientados hacia los agricultores.

181. En los sistemas en que los agricultores tienen menos flexibilidad, el agua se distribuye de acuerdo con un método rígido de rotación, en el cual todos los parámetros se establecen por adelantado. Estos métodos definen las prácticas de riego de los agricultores y, por lo tanto, están orientados al operador o sistemas de suministro.

182. Normalmente un sistema de irrigación por gravedad se maneja de la manera siguiente: los operadores suman todas las demandas individuales a lo largo de cada canal, ya sea basándose en las solicitudes de los agricultores o en los volúmenes establecidos por los administradores del sistema. Esta información de la demanda total se transmite aguas arriba.
183. La transmisión de esa información se puede hacer mediante cualquiera de los dos métodos de operación de canales: control aguas arriba o control aguas abajo. Un sistema de canales controlado aguas arriba requiere que las necesidades individuales de agua se vayan sumando hasta el origen o fuente de abastecimiento. En tanto que en los sistemas de canales controlados aguas abajo, la demanda se transmite aprovechando la hidráulica. Veamos las ventajas y desventajas relativas de estos dos métodos y sus posibles combinaciones, empezando por los sistemas que son controlados aguas arriba.
184. En los sistemas controlados aguas arriba, las necesidades diarias de cada bocatoma se transmiten con algunos días de anticipación a los supervisores responsables de su operación. Estos, a su vez, reportan al centro de operaciones del sistema, cuál va a ser la demanda en las bocatomas.
185. Luego se estima el tiempo de transmisión necesario para que el cambio de nivel pueda llegar desde las obras de cabeza, hasta las diferentes bocatomas. Estos cálculos deben considerar los cambios en el volumen de las cuñas. Las modificaciones en el gasto se realizan en la central del sistema.
186. Un canal controlado aguas arriba se divide en tramos de canal sucesivos mediante estructuras transversales.
187. Si las estructuras transversales son de operación manual, hay que ajustarlas a medida que el cambio de nivel va avanzando aguas abajo.

188. Pueden ser necesarios varios ajustes porque el cambio de nivel va llegando gradualmente a las estructuras. Resulta difícil predecir los ajustes que será necesario hacer en las compuertas de control, debido al gran número de variables hidráulicas.
189. Sin embargo, el control aguas arriba puede mejorar mucho si se utilizan dispositivos automáticos que mantienen un nivel constante aguas arriba de cada estructura.
190. Para un control automático aguas arriba, la única operación que se requiere es la de regular las compuertas en las obras de cabeza y en las bocatomas.
191. Sin embargo, la automatización de las compuertas no elimina las dos desventajas inherentes al control aguas arriba. La primera es la lenta respuesta a los cambios en la demanda y, la segunda, es el desperdicio del agua.
192. Es casi imposible regular con suficiente exactitud el gasto en las obras de cabeza para satisfacer la demanda acumulada y compensar las pérdidas que debido a la infiltración y a la evaporación, se presentan en el cauce. Así pues, el gasto que se establezca en las obras de cabeza, deberá incluir un excedente como margen para asegurar un suministro suficiente en la bocatoma más baja.
193. Cuando se presenta una disminución no programada en la demanda, debida, por ejemplo, a una tormenta, las compuertas se cierran para evitar daños a los cultivos por excesos de agua. El agua almacenada en los volúmenes de cuña se desperdicia por las estructuras laterales limitadoras, escurriendo a los drenes.
194. Ahora veremos el segundo método de operación de sistemas controlados aguas abajo, que funciona con base en la transmisión hidráulica de las variaciones de la demanda.
195. En los sistemas que se controlan aguas abajo, los cambios en la demanda se transmiten de manera hidráulica a través de los diversos estanques que se forman hasta las obras de cabeza. Cada bocatoma se puede abrir o cerrar en cualquier momento, sin necesidad de un aviso previo.

196. En la mayoría de los canales sujetos a un control aguas abajo, los reguladores están equipados con compuertas que responden automáticamente a los cambios de nivel en su estanque aguas abajo.
197. Un aumento en los requerimientos de gasto en un estanque hará que el nivel del agua baje en ese punto y que avance una ola aguas arriba.
198. Cuando el nivel del agua llega al nivel del punto de control límite, la compuerta colocada en el extremo aguas arriba del tramo de canal se abre permitiendo la entrada de caudales adicionales a este.
199. El mismo proceso se repite automáticamente en cada estanque aguas arriba.
200. Los controles aguas abajo tienen tres ventajas: no hay pérdidas de agua debidas a la operación, es posible hacer una distribución totalmente automática, y se consigue una respuesta inmediata y precisa a todas las demandas.
201. No hay necesidad de hacer una programación del sistema más allá de las bocatomas controladas aguas abajo, siempre y cuando haya suficiente gasto en las obras de cabeza. Esto implica que el encargado de la operación del sistema tendrá menos trabajo.
202. Se elimina el problema de tiempo de transmisión inherente a los sistemas controlados aguas arriba y se simplifica considerablemente la programación del sistema. Esto se debe a que cada una de las áreas servidas por un canal de distribución se convierte en un subsistema independiente. La fuente de suministro de agua para el grupo de agricultores en cada subsistema, es entonces el estanque del canal de alimentación controlado aguas abajo que, en cierta forma, hace el papel de un estanque terminal.
203. Los controles ubicados aguas abajo disminuyen el trabajo de los operadores, porque la información que deben transmitir es menor.
204. Una característica sobresaliente de los métodos de control aguas abajo y de volumen constante es que, cuando la demanda disminuye repentinamente, no hay desperdicio de agua, ya que

la que sigue entrando al sistema, para lograr la transmisión hidráulica del cambio en la demanda, se almacena temporalmente en los volúmenes de cuña. Los controles ubicados aguas abajo también ahorran agua debido a que el gasto que entra en cualquier estructura de control y en las obras de cabeza, es exactamente igual al volumen de agua que se desvía en las bocatomas, incluyendo el volumen infiltrado.

205. Sin embargo, el método de control aguas abajo tiene una desventaja económica. La pendiente longitudinal de un canal no debe sobrepasar los 20 o 25 centímetros por kilómetro. De lo contrario, la obra civil requerida para elevar las secciones de relleno del terraplén del canal podría resultar demasiado costosa.
206. Otro problema relacionado con el control aguas abajo, surge cuando la demanda es superior al volumen de agua disponible en las obras de cabeza. Si el gasto total que se desvía en las tomas excede la capacidad de abasto, el canal se irá drenando gradualmente en dirección aguas abajo. Esto deja a los agricultores de las tomas cercanas a la cabecera sin agua, en tanto que, los que están al final, siguen satisfaciendo todas sus necesidades. Hay dos soluciones posibles para este problema.
207. Una solución es racionar el gasto que se desvía en cada toma y que, en términos generales, no está bajo el control directo del agricultor.
208. La segunda solución es instalar compuertas compuestas diseñadas para funcionar con sistemas de control aguas abajo, así como para evitar que el tirante aguas arriba caiga por debajo de un mínimo predeterminado.
209. En el caso típico que acabamos de describir, los controles aguas abajo se utilizan para simplificar la operación del canal troncal. Esto evita una programación compleja o la necesidad de utilizar modelos computarizados de los canales. El sistema de distribución sujeto a control aguas arriba es supervisado por el personal encargado de la operación para evitar un suministro injusto a los agricultores, y evitar el desperdicio del agua. El método de control aguas abajo no debe confundirse con un sistema de distribución basado únicamente en el concepto de libre demanda a nivel de predio.

210. La combinación de controles aguas arriba y aguas abajo, puede proporcionar ventajas de operación y económicas bajo ciertas condiciones topográficas, dependiendo de las características de la distribución en la red de canales.
211. Estudiaremos tres ejemplos de sistemas que se han desarrollado en Marruecos y en los que se han combinado controles aguas arriba y aguas abajo a lo largo de los canales principales.
212. En el caso del proyecto Doukkala, la mitad superior del canal principal está sujeta a controles aguas arriba y la mitad inferior a controles aguas abajo. El agua va entrando al sistema desde la presa de almacenamiento con base en una proyección aproximada de la demanda. Los excesos o déficits pasan automáticamente aguas abajo en esta parte del canal.
213. Un vaso regulador, ubicado en el punto medio del canal principal, funciona como amortiguador de las variaciones en el gasto.
214. La mitad inferior del canal de Doukkala se controla aguas abajo con estanques reguladores. A medida que se necesita agua se va derivando del vaso amortiguador.
215. Las descargas de la presa de almacenamiento se basan sencillamente en la demanda acumulada del día siguiente y se ajustan si el vaso amortiguador se está llenando o vaciando. A pesar de la pequeña capacidad de almacenamiento de éste vaso, ha demostrado ser suficiente para absorber las diferencias entre el suministro y la demanda. El vaso puede ubicarse a un lado del canal y conectarse con el canal principal mediante una estructura doble.
216. El vaso amortiguador también puede ubicarse arriba del canal, ya que las necesidades de bombeo son pocas y únicamente pasarán al vaso amortiguador las diferencias de gasto entre el suministro y la demanda.
217. En el caso del proyecto Beni-Moussa, la parte superior de los dos canales principales se controla aguas abajo. Estos canales se inician en el estanque de descarga de una planta hidroeléctrica que descarga agua diariamente durante las horas de mayor demanda.

218. Ya que la capacidad de este estanque es muy limitada para dar cabida al volumen de agua que se descarga durante las horas pico...
219. ... se han instalado compuertas especiales para almacenar estos volúmenes en los dos canales, a la vez que se continúa la operación de control aguas abajo.
220. El canal Beni-Amir, se está modernizando actualmente. Incluirá una serie de secciones de control, tanto aguas arriba como aguas abajo, para reducir al mínimo los costos de inversión en las secciones de conducción sin bocatomas.
221. La combinación de controles aguas arriba y aguas abajo, puede dar como resultado soluciones económicas para varias situaciones. El control aguas abajo no tiene necesariamente que limitar su uso a los sistemas que se abastecen de presas de almacenamientos, también puede aplicarse en los casos en que el gasto sea limitado o errático, tal es el caso de algunos sistemas que derivan el gasto de un río. Como vimos antes, el control aguas abajo constituye un medio para simplificar la operación del canal principal, pero no es sinónimo de la demanda de riego. Si es necesario, se puede racionar el agua a nivel de la distribución, que en la mayoría de los casos se controla aguas arriba.
222. FIN DE LA PARTE IV.

223. PARTE V: CONTROL CENTRALIZADO.

224. En esta parte hacemos un repaso de los métodos centralizados de control de la red de canales orientados a los operadores y a los agricultores.
225. En los sistemas controlados aguas abajo que estudiamos en la PARTE IV, las estructuras de control se ponen en operación en forma secuencial, a medida que la carga hidráulica se incrementa o decrece a lo largo del canal.
226. En el caso del control remoto centralizado, todas las instalaciones de regulación de los canales, incluyendo las plantas de bombeo, los vasos amortiguadores y las bocatomas, pueden entrar en operación casi simultáneamente, ya que se operan desde un centro de control y los cambios solicitados en el gasto pueden hacerse inmediatamente.
227. Un sistema de control centralizado típico desempeña cinco funciones básicas para la operación de un sistema de irrigación: obtención de datos, comunicación de datos, procesamiento de datos, transmisión de órdenes y operación de los dispositivos de control.
228. La primera función es la obtención de datos acerca de los cultivos y de las condiciones climatológicas. Esto incluye el seguimiento y la evaluación de las instalaciones de control como son: el nivel del agua y la posición de las compuertas.
229. La segunda función es la comunicación y la transmisión de datos al centro de operaciones.
230. La tercera función es el procesamiento de datos.
231. La cuarta función es la transmisión de órdenes.
232. La quinta función es la operación de los dispositivos de control.

233. En su forma más sencilla, la operación de un sistema centralizado es relativamente simple. Todos los datos se recaban y se transmiten oralmente a un centro de operaciones. Después de procesar los datos, manualmente o con microcomputadoras, un supervisor central decide cuáles son los ajustes que requiere el sistema.
234. Las instrucciones se transmiten por vía oral desde el centro de control para que las lleven a cabo los operadores de campo.
235. Esta forma simplificada de control centralizado requiere de supervisores con mucha experiencia en el manejo del sistema de canales y de sus posibles efectos.
236. Esto se debe a la gran cantidad de factores considerados y a lo complejo que es un flujo inestable en los canales. Para una mayor precisión en el manejo del agua en un sistema de gran escala, es necesario procesar de inmediato la gran cantidad de datos que continuamente llegan. Las computadoras para uso industrial han abierto nuevas posibilidades para el procesamiento de los datos que permiten determinar los complejos ajustes que se deben efectuar.
237. El primer paso en un sistema de control centralizado, es la instalación de un sistema de monitoreo remoto que recabe los datos de operación y los envíe a la central, activando una alarma en cuanto se presente un problema. Generalmente es posible aprovechar estos sistemas para ejercer un control remoto sobre ciertas estructuras clave.
238. Los especialistas en controles remotos dividen los sistemas computarizados centralizados en dos tipos. Uno es el sistema de circuito abierto, que requiere la intervención de un operador para una de las cinco funciones. El segundo es un sistema de circuito cerrado que es totalmente automático.
239. Un ejemplo de sistema de circuito abierto computarizado es el proyecto de Salt River, en Arizona. Este proyecto se inició a principios de 1900, se modernizó en 1950 y las instalaciones más modernas de control se terminaron a mediados de los setenta. Esto permite la operación a control

remoto, el monitoreo de las compuertas en los canales y la medida automática de los niveles de agua en cualquier punto de los canales principales.

240. Los requerimientos de agua se introducen a la computadora que determina el orden de apertura de las compuertas para limitar la variación de los niveles dentro de más o menos ocho centímetros.
241. Los operadores manejan el sistema desde una consola maestra, en tanto que el sistema de canales de distribución se opera localmente.
242. Como en el caso de los métodos de control local, hay dos maneras de tener acceso al control centralizado computarizado. La primera es a base de una programación por adelantado de la demanda de agua y está orientada al personal de operación. La segunda responde automáticamente a cualquier cambio en las condiciones hidráulicas o en la demanda de agua, y está orientada a los agricultores. Repasaremos estas dos formas de atacar el problema, empezando por el primer caso
243. Según el primer enfoque, un operador tiene que introducir a la computadora los requerimientos de agua del día siguiente, los niveles que tiene el agua en ese momento, las aperturas de las compuertas y el gasto. Por lo tanto, se trata de un sistema de "circuito abierto".
244. El control dependerá de las características del sistema de distribución. Por otra parte, es importante lograr un control preciso de los niveles del agua en los canales laterales abiertos o en las tuberías a baja presión.
245. No es esencial un control preciso del nivel del agua si las secciones de conducción de los canales no tienen bocatomas o si el agua se distribuye a alta presión o por tuberías con o sin uso de bombeo siempre y cuando el nivel no exceda los límites de seguridad.

246. Un control remoto totalmente centralizado abarca mucho más que la simple función de monitoreo. Los datos provenientes del campo se utilizan como entradas para un modelo de cómputo denominado "lógica de control" que simula la hidráulica de un sistema de canales.
247. Los programas de simulación permiten estimar el comportamiento de los canales bajo diferentes condiciones de gasto y los movimientos en las compuertas. Sin embargo, los modelos de simulación hidráulica llegan a ser muy difíciles de utilizar cuando son muy exactos, debido a la magnitud de sus programas, a la cantidad de variables hidráulicas y a las complejas operaciones matemáticas que requiere el análisis de un flujo inestable.
248. La exactitud de estos programas se ve restringida por las dificultades que se tienen para estimar correctamente los valores hidráulicos en campo. Por ejemplo, la rugosidad de un canal puede variar mucho durante la época de riego, debido al desarrollo de maleza en su cauce.
249. En los canales antiguos, sin revestimiento, es difícil aplicar un modelo debido a que en general sus dimensiones son variables e irregulares.
250. Una simulación hidráulica exacta requiere del desarrollo de ecuaciones de descarga para las compuertas. Es necesario obtener en el campo los coeficientes de descarga para calibrar cada compuerta bajo una amplia gama de gastos.
251. El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos, desarrolló un programa para computadora llamado Gate Stroking. Se trata de un modelo que calcula una serie de movimientos en las compuertas para obtener el perfil deseado en la superficie del agua en un canal. Los niveles de agua se controlan cuidadosamente
252. Este tipo de control no proporciona una respuesta automática ni una regulación dinámica. El programa Gate Stroking calcula los cambios según una programación de suministros establecidos. Cualquier cambio en el programa requiere ajustes manuales o el uso de controles automáticos locales.

253. En los sesenta se desarrolló un método más moderno de control remoto para operar el acueducto California, que tiene una longitud de más de 600 kilómetros. El sistema suministra agua a usuarios urbanos y agricultores mediante una serie de estaciones de bombeo y más de 60 estructuras reguladoras. La capacidad máxima de diseño es de aproximadamente 430 metros cúbicos por segundo.
254. El personal encargado de la operación del acueducto trata directamente con las autoridades de los sistemas de riego y de los municipios, pero no con los usuarios en forma individual. Los encargados de los sistemas de riego tienen la obligación de notificar al centro de operaciones, con 24 horas de anticipación, los requerimientos y los cortes que tengan programados.
255. Parte de la lógica que emplea este método se denomina principio de "Volumen Controlado" que difiere del programa Gate Stroking en que se le da más atención al control del volumen de agua en cada estanque, en lugar de sostener niveles exactos de agua.
256. El programa de cómputo calcula los gastos y los volúmenes en cada estanque del canal. Se determinan los movimientos de las compuertas y los programas de bombeo con base en las solicitudes de agua para el día siguiente, las condiciones del flujo y la cantidad de energía disponible.
257. Ya que las bombas a lo largo del acueducto pueden consumir hasta 13 mil millones de kilowatts-hora por año, la lógica del control fue diseñada para variar el almacenamiento en los estanques e incrementar el bombeo cuando las tarifas de energía eléctrica son más baratas, es decir, fuera de las horas pico.
258. Por lo general, los cálculos se actualizan solamente una o dos veces al día. Es posible lograr un control exacto si todas las variables hidráulicas se determinan correctamente y si los cambios en el gasto se ajustan a un programa convenido por adelantado con los usuarios.
259. Si todas las compuertas se mueven casi simultáneamente, el tiempo máximo de demora en cualquier punto del sistema será el tiempo de recorrido de un cambio de gasto en un solo estanque. El cambio del gasto ocurre en todos los estanques

al mismo tiempo, de tal manera que los usuarios aguas abajo no tengan que esperar a que el cambio viaje varios cientos de kilómetros: estructura por estructura.

260. En resumen, la lógica de "Volumen Controlado" que se utilizó en el acueducto California es confiable pero, tal y como se opera en la actualidad, no responde en forma automática a las demandas de los usuarios, pues requiere del conocimiento previo de las necesidades de entrada y de las solicitudes de agua.
261. Un enfoque similar se está usando en el Proyecto Central de Arizona (CAP), el cual está parcialmente terminado y llevará agua del río Colorado a la parte central de Arizona con el fin de reemplazar el agua de pozos que se usa para ciudades, industrias y agricultura. Mediante un sistema de 550 kilómetros de longitud, que incluye: canales, sifones invertidos, túneles y plantas de bombeo, conducirá las aguas del río Colorado a través del estado de Arizona.
262. El agua será elevada casi 950 metros desde el río Colorado mediante 14 plantas de bombeo. La capacidad inicial del sistema es de 90 metros cúbicos por segundo.
263. Las instalaciones para la operación del CAP, que incluyen plantas de bombeo, estructuras de seguridad y bocatomas, serán operadas por control remoto mediante un sistema de comunicaciones por cable y por microondas desde el centro de operaciones del proyecto cerca de Phoenix.
264. Los operadores en el centro de control hacen un monitoreo del funcionamiento del sistema, efectuando, de ser necesarios ajustes y corrigiendo los problemas que se van presentando. El principio de volumen controlado también se utiliza en la lógica del control. Asimismo, es posible hacer un monitoreo de los niveles del agua en cada estanque.
265. Los cambios en la demanda de agua alimentan a la computadora dos veces al día. En el futuro, mediante pequeños cambios en la lógica de control, será posible efectuar cambios cada hora, lo que permitirá al programa de cómputo responder mejor al manejo del sistema de irrigación y de las variaciones en el abastecimiento de agua a las zonas industriales y urbanas.

266. Los sistemas centralizados, como los aquí descritos, requieren de programas exactos de suministro. Lo ideal, para que un sistema de control pudiera funcionar con precisión, sería poder responder mejor a las necesidades de los usuarios sin una programación tan rígida.
267. Ahora analizaremos el segundo enfoque sobre controles centralizados orientados al usuario. Un sistema de control con este enfoque responde rápida y automáticamente a los cambios, en lugar de requerir una programación anticipada. Estos programas son similares, aunque más pequeños que el Gate Stroking.
268. Este sistema se inició en el sureste de Francia. La regulación de la operación, mediante un sistema computarizado dinámico, se inició en 1971 en una parte del sistema de canales de Provence.
269. Desde esa fecha se ha puesto en marcha con éxito, en 260 kilómetros de canales. El sistema de abastecimiento del agua es mixto, ya que consiste de plantas de bombeo, canales revestidos de concreto hidráulico y tuberías de distribución a alta presión. El sistema se diseñó originalmente con base en una combinación de controles aguas arriba y aguas abajo equipado automáticamente, pero resultaba muy caro debido a lo escabroso de la topografía. En su lugar se adoptó un sistema computarizado moderno.
270. Se desarrolló además un modelo de simulación de la hidráulica de un gran canal, pero no se usó para su control, sino para desarrollar un pequeño programa del control lógico que actualmente se usa.
271. Dos terceras partes de los usuarios, que son municipales o industriales, tienen un patrón predecible de uso del agua fácil de evaluar por métodos estadísticos. El resto de los usuarios son agricultores con cultivos bajo riego, cuyas necesidades de agua son más difíciles de predecir.
272. Se hace una lectura de las medidas cada 7 segundos y cada 15 minutos se actualizan las predicciones del uso del agua para que un pequeño programa de computadora decida si hay que hacer cambios en las compuertas.

273. El programa de computadora examina el nivel del agua en cada estanque y compara los gastos reales con las predicciones estadísticas de la demanda. Como resultado se determinan los movimientos de las compuertas desde las instalaciones centrales.
274. Se evita hacer cálculos hidráulicos muy precisos por que son muy engorrosos y porque cuando se encuentra la solución el problema ha cambiado.
275. Esta combinación de información estadística, exactitud, frecuencia de actualización de las órdenes y la secuencia del movimiento de las compuertas, dan como resultado un sistema que funciona totalmente con base a la demanda y con un alto grado de flexibilidad.
276. El sistema de distribución por tubería de Provence, dió lugar a un método de operación que responde con facilidad a las necesidades de los usuarios, lo cual no había sido logrado por ningún sistema de canales hasta entonces. Los sistemas de irrigación, que van a recibir el agua del proyecto "Central de Arizona", tendrán esta posibilidad por lo menos desde el punto de vista técnico. Todas las instalaciones del Distrito Maricopa, incluyendo el canal Santa Rosa, ramal del CAP, y todos los canales laterales serán operados a control remoto.
277. Los agricultores podrán ajustar sus tomas ubicadas cerca de las estructuras reguladoras operadas a control remoto en los canales laterales.
278. Las tomas de los predios estarán equipadas con medidores de gasto ultrasónicos.
279. Estos medidores proporcionarán lecturas digitales del gasto así como de los volúmenes totales.
280. Se han revisado dos diferentes métodos de control centralizado para sistemas de canales utilizando la computadora. El programa de simulación del acueducto de California y otros como el Gate Stroking son confiables y seguros, sin embargo, como generalmente se aplican requieren de un calendario anticipado. Ambos, el canal Provence, con

un sistema de distribución por tuberías y el sistema de canales del Distrito de Maricopa permiten una operación a la demanda que satisface las necesidades de todos los usuarios.

281. El control centralizado puede introducirse por etapas. El grado de sofisticación puede incrementarse progresivamente en el sistema de canales a control remoto, y podrá expandirse como en el caso del proyecto del río Salado.
282. Las computadoras obviamente auxilian en los complejos modelos de los canales bajo condiciones inestables, por lo que deberán ser complementadas con equipos confiables para la toma y transmisión de datos. Aún más, deberán ser cuidadosamente seleccionadas, de tal manera que el procesamiento de datos y las instrucciones sean compatibles con las características físicas del sistema y con la filosofía de su manejo.
283. Por supuesto, la utilidad de un sistema está dada por el servicio que proporciona. Con los controles automatizados se pueden lograr altas eficiencias en el manejo del agua, sin embargo la respuesta ante las necesidades de los usuarios también es importante.
284. FIN DE LA PARTE V.

285. PARTE VI: EQUIPO DE CONTROL.

286. Ahora que hemos revisado los diferentes conceptos en canales y la operación de sistemas, analizaremos el equipo de control. Específicamente las alternativas del control local en varios puntos del sistema de irrigación: repartidores de gasto, control del nivel del agua, combinación de gasto y nivel del agua a lo largo de los canales, control del gasto en las bocatomas y una combinación de todas estas.
287. Después revisaremos brevemente las características de algunos equipos usados para control remoto y control centralizado.
288. Algunos dispositivos operados manualmente, motorizados o no, requieren de ajustes frecuentes. Ciertos dispositivos hidráulicos, sencillos pero ingeniosos, funcionan automáticamente y no requieren fuentes externas de energía. Otros dispositivos pueden ser controlados automáticamente empleando mecanismos eléctricos locales o centralizados.
289. El origen de algunos equipos usados en la irrigación se ha perdido en el tiempo. Otros como la rueda persa, se han propagado en todo el mundo mediante la transferencia de tecnología.
290. El funcionamiento de cualquier sistema de irrigación depende de su sistema de control. Sin embargo, muchos países han puesto poco énfasis en esto. La mayoría de los proyectos construidos en el pasado e incluso algunos que actualmente se encuentran en construcción, requieren operadores para ajustar con frecuencia los sistema de control. Revisemos algunos progresos en el pasado inmediato para proporcionar autocontrol en la irrigación.
291. Durante el siglo XIX se desarrollaron en el sureste de Europa módulos hidráulicos automáticos como un vertedor circular conectado a dos flotadores. Aún cuando técnicamente su funcionamiento es correcto, estos módulos con partes móviles, no son confiables, debido a la fricción mecánica. En los inicios de 1900, se desarrollaron también, en la India, varios desagües modulares que fueron diseñados para extraer el llimo de los canales de distribución.

292. Al principio del decenio de los cuarenta, tuvo lugar un progreso importante en la tecnología del control de canales, con el desarrollo de un equipo hidráulico automático. Tres décadas más tarde, se introdujeron sistemas avanzados de comunicación, electroprocesadores y computadoras.
293. Las investigaciones sobre equipo hidráulico fueron iniciadas por el "Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique" en Grenoble, Francia, a fines de los treinta, con el objeto de introducir esta técnica en los sistemas de irrigación del norte de Africa. El objetivo más importante fue la simplificación de las operaciones mediante la automatización hidráulica.
294. Cincuenta años más tarde el equipo hidráulico desarrollado en Grenoble aún se fabrica y se usa en cerca de 20 países, principalmente en la cuenca del Mediterráneo y en el Asia Occidental.
295. Las investigaciones sobre sistemas de control remoto y centralizado se iniciaron en los Estados Unidos y en Francia a mediados de los sesenta, cuando la industria de la computación y de las comunicaciones habían desarrollado tecnologías que podían aplicarse al sistema de control del agua.
296. Antes de describir en detalle el equipo de control, revisemos las características de operación de los dos dispositivos hidráulicos básicos, usados en el control de canales, estos son: los vertedores y los orificios. Debido a sus diferentes ecuaciones matemáticas...
297. ... las respuestas a los cambios en el gasto son diferentes para los vertedores y para los orificios. Un 20 por ciento de aumento en el gasto sobre un vertedor, requiere 12 por ciento de aumento de la carga de agua sobre la cresta del mismo; en cambio, en un orificio, el aumento de nivel requerido es de 40 por ciento.
298. Esto significa que las fluctuaciones del nivel del agua, debidas a las variaciones en el gasto, serán relativamente pequeñas en un canal controlado por dispositivos de excedentes y no requerirá ajustes frecuentes. Por el contrario, la operación de un canal equipado con compuertas de descarga inferior, requiere reajustes frecuentes para mantener un nivel casi constante.

299. Además de su mayor sensibilidad a las variaciones del gasto, las compuertas de descarga inferior tienen otras desventajas. Una de ellas es que las descargas a través de compuertas, se ven afectadas por las condiciones aguas abajo, a menos que estas condiciones sean de descarga libre. Es por lo tanto, difícil mantener condiciones de gasto estable en canales equipados con compuertas de descarga inferior controladas manualmente, debido a la interacción entre los embalses de los canales. A pesar de esta dificultad, las compuertas de descarga inferior controladas manualmente, se usan con mayor frecuencia que las estructuras de descarga superior.
300. Iniciaremos ahora nuestra revisión del equipo de control. Primero veremos los repartidores de gasto.
301. Estas son estructuras estáticas tipo vertedor que aseguran la partición automática del gasto. Se les encuentra con frecuencia en los sistemas tradicionales donde los derechos del agua están bien establecidos.
302. Estas estructuras se han usado para mejorar los sistemas tradicionales en el norte de Africa, a fin de mantener, aguas abajo, los derechos de uso del agua.
303. El gasto de llegada puede ser repartido entre varios canales de acuerdo con cantidades fijas.
304. La relación de caudales, puede ajustarse a través del manejo de una compuerta vertical divisoria.
305. Las estructuras repartidoras de gasto se usan en los sistemas terciarios de los proyectos modernos para dividir, en forma equitativa, un gasto dado entre los predios.
306. El segundo tipo de equipo de control son los reguladores del nivel del agua.
307. Estos controlan el nivel del agua en puntos críticos de un canal. Algunas estructuras, tales como los vertedores de concreto, son estáticas; otras, tales como las compuertas de descarga inferior o de descarga superior, son ajustables, ya sea en forma automática o manual.

308. En su forma básica, un vertedor consiste en una estructura sencilla de derrame superior atravesada en un canal en la que el agua derramada por la parte superior. Estos vertedores pueden ser móviles o fijos.
309. Las agujas se usan para formar un vertedor ajustable. Las tablas se quitan o se agregan para producir cambios importantes en el gasto.
310. Sin embargo, el manejo de las agujas puede ser peligroso para el personal encargado de su operación.
311. Hay vertedores que se ajustan manualmente y pueden operarse sin riesgo desde el talud del canal, mediante el uso de un sistema de engranajes.
312. Se pueden instalar compuertas motorizadas de descarga superior en canales principales. Estas pueden ser ajustadas por los operadores en el sitio, mediante el uso de botones de control para mantener un nivel constante. De ser necesario, podrían en el futuro ser operadas mediante control remoto. Compuertas de este tipo existen en Malasia.
313. Los vertedores de cresta larga mantienen automáticamente, aguas arriba, un nivel casi constante del agua, incluso con cambios relativamente grandes en el gasto. Esto es una ventaja para el control del gasto en las tomas localizadas cerca de estos vertedores.
314. Los vertedores de cresta larga pueden ser oblicuos, en canales principales.
315. O hasta en canales terciarios.
316. Los vertedores tipo pico de pato, se pueden orientar aguas abajo.
317. O aguas arriba.

318. Pueden existir combinaciones de tres vertedores tipo pico de pato, como los usados en el canal principal de Doukkala en Marruecos.
319. Las estructuras reguladoras transversales, equipadas con compuertas de descarga inferior, se pueden operar manualmente. Sin embargo, el manejo de compuertas grandes y pesadas es cansado y el número de ajustes resulta limitado por el tiempo.
320. Para superar esta limitación, las compuertas grandes en los proyectos recientes se han mecanizado, y pueden operarse mediante control local o remoto.
321. En un canal equipado con compuertas de descarga inferior, el intervalo en la transferencia del volumen de agua puede reducirse abriendo totalmente las compuertas. Esta flexibilidad no se obtiene cuando se usan sólo vertedores estáticos.
322. Por lo tanto, una solución atractiva es combinar los vertedores y las compuertas de descarga inferior. En esta forma, se da cabida a los grandes cambios en el gasto mediante el reajuste de la compuerta, y permite cambios pequeños, variando el tirante del agua sobre los vertedores laterales.
323. Hay en uso combinaciones de compuertas y vertedores.
324. Otra posibilidad consiste en instalar compuertas que mantienen automáticamente un nivel constante aguas arriba. Su diseño es semejante al de las compuertas de nivel constante aguas abajo.
325. El tercer tipo de equipo que revisaremos controla simultáneamente tanto el gasto como el tirante del agua a lo largo de un canal. Esto puede lograrse mediante un suministro eléctrico o regulación hidráulica.
326. Primero veremos la regulación por medios eléctricos. En este caso, la operación de una compuerta convencional es mecanizada y automatizada mediante un controlador local independiente, diseñado para fijar uno de los

parámetros hidráulicos del canal a un valor deseado. Los parámetros que pueden controlarse son: el tirante de aguas arriba o aguas abajo en los estanques adyacentes, el volumen en el estanque aguas abajo, la carga sobre la compuerta o cualquier combinación de estos parámetros.

327. Un dispositivo electromecánico, conocido como "Littleman", fue diseñado por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos. En proyectos más recientes se usa un microprocesador unido a un transductor de presión.
328. Este dispositivo, aparentemente sencillo, es bastante complicado.
329. Los componentes básicos de una instalación "Littleman" son: una banda inmóvil, velocidades múltiples y un mecanismo antioscilante para evitar la corrección excesiva y la inestabilidad hidráulica.
330. Todas las tareas que puede realizar un electrocontrolador pueden ejecutarse en forma más simple mediante dispositivos hidráulicos automáticos...
331. ... tales como las compuertas de nivel constante aguas arriba o aguas abajo, que no requieren de electricidad y sólo tienen una parte móvil. Funcionan según el principio de igualdad de fuerzas. La fuerza hacia abajo del recipiente de lastre es equilibrada por la fuerza hacia arriba de un flotador.
332. Durante la instalación de la compuerta, el lastre debe ajustarse con precisión, para lograr estabilidad en cualquier posición de la compuerta.
333. El punto de referencia del tirante del agua es el eje de rotación.
334. Las compuertas aguas arriba o aguas abajo se fabrican en varios tamaños. El diseñador de los sistemas puede seleccionar el tamaño más apropiado para el gasto y la carga hidráulica disponibles.

335. En algunos casos, el equipo del canal deberá responder a un conjunto más complejo de condiciones hidráulicas. Se han desarrollado con este fin diferentes tipos de las llamadas compuertas compuestas.
336. Estas compuertas mantienen un nivel constante aguas abajo durante la operación normal y el nivel aguas arriba entre un máximo y un mínimo. Cuando el suministro excede súbitamente a la demanda, las compuertas evitarán la sobrecarga. Por otra parte, cuando la demanda excede al suministro, no existe el peligro de que los canales se vacíen.
337. Las compuertas compuestas pueden usarse también para almacenar agua en canales muy profundos diseñados para tal fin. En ese caso, las compuertas mantienen una carga constante entre las partes aguas arriba y aguas abajo, evitando el sobrellenado y el vaciado, como se indicó antes.
338. Estas compuertas son especialmente atractivas cuando hay una planta generadora de energía hidroeléctrica en el canal o cuando éste se abastece mediante una planta de bombeo, operada durante las horas de menor demanda de energía.
339. La continuidad de la automatización también puede lograrse cuando se incorporan líneas cortas de tubería al sistema de un canal. En algunos casos las válvulas de disco autocentradas, actuando como una válvula de flotador balanceado y operando a bajas presiones, mantienen el nivel del agua constante aguas abajo, como lo hacen las compuertas en condiciones de descarga libre, discutidas antes.
340. A continuación, dirigiremos nuestra atención al control del gasto en las tomas de agua.
341. Se tienen dos opciones para controlar el gasto en las tomas de agua mediante equipo hidráulico o eléctrico. El objetivo es entregar un gasto constante, gasto normal en las tomas, a pesar de las variaciones del tirante aguas arriba de la estructura de control.

342. Las tomas de agua deberán estar dotadas de una carga en el fondo (orificio), más que de una descarga superior (vertedor) cuando ello sea posible. Las fluctuaciones en el canal abastecedor tendrán menor efecto sobre las descargas efectuadas a través de un orificio que por medio de un vertedor. En este caso, el gasto proveniente de una toma simple colocada en el fondo del canal y que descarga en forma libre apenas será afectada por las variaciones del tirante del agua en el canal.
343. En algunos proyectos, sin embargo, las tomas consisten en vertedores móviles, en tanto que las estructuras de orificio serían más apropiadas.
344. Las tomas más comunes consisten en una estructura sencilla ajustable asociada a un dispositivo aforador, que debe ser reajustado en forma manual con tanta frecuencia como sea necesario.
345. Este es un proceso laborioso que requiere operadores dedicados y expertos, capaces de leer gráficas y diagramas y de calibrar escalas.
346. Para evitar problemas de personal en cuanto al ajuste manual, la estructura podría operarse en forma automática si se mecanizara. Una alternativa consiste en usar un electroprocesador para activar la compuerta a fin de mantener un nivel constante tal como el nivel normal sobre un vertedor de gasto calibrado o la diferencia de carga sobre un orificio hasta que se haya establecido el gasto normal. Este ajuste puede ser objeto de control local o remoto.
347. La segunda alternativa es usar distribuidores hidráulicos, comúnmente llamados módulos, que son autocontroladores del gasto y no simplemente dispositivos aforadores.
348. Un módulo consiste simplemente en un vertedor sumergido con uno o dos deflectores. La contracción de la vena cuando el caudal cambia de un vertedor...
349. ... a un régimen de orificio, garantiza un gasto constante, naturalmente dentro de ciertos límites del nivel aguas arriba.

350. Existen variaciones del gasto debidas al tirante del agua sobre el umbral, para un módulo con un sólo deflector. Los módulos, que proporcionan 20, 50 y 100 litros por segundo por decímetro, con una precisión de ± 10 por ciento, pueden aceptar variaciones en el nivel aguas arriba de 11, 19 y 31 centímetros respectivamente.
351. Con deflectores dobles, las variaciones aceptables del nivel aguas arriba, para módulos del mismo tamaño, son de 28, 52 y 83 centímetros. Esto es, casi 3 veces las variaciones aceptables para módulos de un sólo deflector.
352. Con módulos de deflector simple o doble la descarga se puede controlar con facilidad variando simplemente el ancho de la sección del flujo. Por lo tanto, un distribuidor consta de una serie de elementos modulares de diferentes anchos que se controlan por pequeñas compuertas situadas en una de las dos posiciones: "abierto o cerrado". Por ejemplo hay módulos de dos compuertas centrales que suministran 100 y 200 litros por segundo.
353. Existen módulos de diferentes tamaños y anchos que pueden ser seleccionados por los diseñadores dependiendo de la capacidad de las tomas y de las posibles variaciones del nivel aguas arriba.
354. Este es un ejemplo.
355. Y este es otro.
356. La operación de los módulos es muy sencilla, incluso para operadores inexpertos. Proporcionan un gasto constante con variaciones del 5 al 10 por ciento en más o en menos, dependiendo de las variaciones en el nivel aguas arriba.
357. Pueden usarse como aforadores con sólo registrar los tiempos de apertura y cierre de las compuertas.
358. Los agricultores aprecian la seguridad y la facilidad con que pueden controlar el gasto suministrado a sus predios por estos dispositivos.

359. En seguida revisaremos cómo obtener el gasto y el control en las tomas, al mismo tiempo que el control del gasto y el nivel en el canal de abastecimiento.
360. En la etapa de diseño, las tomas y los reguladores transversales deben ubicarse estratégicamente para usar el equipo de control en la mejor forma.
361. En un canal bajo control aguas arriba, las tomas deberían estar ubicadas de preferencia aguas arriba del regulador, con el fin de facilitar el paso del gasto normal en los canales laterales.
362. De manera inversa, en un canal controlado aguas abajo las tomas deberán estar situadas en el extremo aguas arriba de los embalses.
363. Dependiendo de las variaciones en el nivel del agua se pueden usar módulos con deflector sencillo o doble.
364. Cuando las variaciones excedan los límites aceptables de los módulos apropiados, se podría instalar, aguas arriba del módulo, una compuerta para mantener un nivel constante aguas abajo sobre el canal secundario. Puede agregarse una compuerta deslizante de emergencia, que permita cerrar el canal secundario para realizar trabajos de mantenimiento.
365. Hay vertedores oblicuos que pueden controlar el nivel aguas arriba de un módulo que permita el paso de 30 litros por segundo a una toma granja.
366. Los módulos también pueden alimentar a un canal lateral desviando agua de un canal principal controlado aguas abajo...
367. ... o estar instalados con una compuerta de nivel constante aguas abajo, que opera con una carga de unos cuantos metros, creada por un embalse aguas arriba.
368. ... o bien pueden estar asociados con una válvula de disco que controla el nivel del agua en el extremo inferior de una tubería a baja presión.

369. Finalmente, revisaremos varios aspectos del equipo usado para control remoto, localizado o centralizado.
370. Este equipo se desarrolló rápidamente con los progresos tecnológicos en los sistemas de comunicación, los microprocesadores y las computadoras.
371. Gran parte de este equipo es estandar, con elementos tales como radio; sistemas de comunicación mediante microondas o satélite; computadoras e instrumental asociado; impresoras y pantallas de televisión.
372. Otros equipos que se usan para el control centralizado pueden hacerse especialmente para el proyecto.
373. Como pueden ser dispositivos para medir la apertura de las compuertas.
374. Algunos sistemas se conectan mediante líneas de comunicación mientras, que otros usan radio o microondas. Las operaciones de control remoto exitosas tienen con frecuencia el apoyo de un sistema de comunicación automático e independiente.
375. Otros sistemas usan microprocesadores locales cerca de cada estructura de comprobación, para condensar la información que debe ser enviada a una instalación de control remoto.
376. Los sistemas que emplean control automático y remoto deben contar además con dos niveles de control manuales, uno que predominaría sobre el control central automático y otro sobre el control del terreno. Tanto los operadores del centro de control como los de campo, deben ser capaces de manejar manualmente sus controles.
377. Además de duplicar los sistemas de comunicación y los niveles de mando, los sistemas de control computarizados deben tener suministro de energía de emergencia. Los generadores de emergencia deben ponerse en marcha una vez a la semana para una comprobación de rutina.

378. Las precauciones de seguridad a diferentes niveles de un sistema de control computarizado son necesarias porque pueden ocurrir fallas de todo tipo. Con medidas de seguridad apropiadas estas fallas no afectarán la operación del sistema de canales.
379. Antes de terminar esta parte, deseamos hacer dos observaciones importantes. En esta presentación del equipo de diseño moderno no hemos discutido ningún dispositivo de aforo del gasto. En sentido estricto no se miden los gastos. La operación del canal principal y de los de distribución se basa en los niveles del agua. Los gastos en las tomas de los canales secundarios o de salida a los predios son autocontrolados. Como otros dispositivos industriales o domésticos, tales como el control de la temperatura en un local, el gasto se fija con un dispositivo de control que lo mantiene constante.
380. En esta parte hemos revisado el equipo disponible para mejorar el control del agua en los sistemas de riego de gravedad. Queda fuera del alcance de esta presentación el discutir los sistemas de riego entubados. Estos son casi tan variados como los correspondientes a los canales abiertos; desde los sistemas de líneas de tuberías a baja presión instaladas por los usuarios innovadores, hasta los sistemas de tubos de concreto reforzado, equipados con reguladores de presión y válvulas de control del gasto.
381. FIN DE LA PARTE VI.

382. PARTE VII: SELECCION DEL METODO DE OPERACION MAS ADECUADO.

383. En las partes anteriores se vió que existe una gran variedad de alternativas para el manejo y la operación de sistemas de irrigación. En esta parte, revisaremos los múltiples factores que influyen en la selección de los métodos y las técnicas para la operación de los canales de riego.
384. La selección de la tecnología para cierto patrón de cultivos bajo diferentes circunstancias físicas y socioeconómicas, involucra un gran número de consideraciones. Solo se identificarán aquellas que son esenciales para la selección del método adecuado de operación del sistema de irrigación.
385. La política nacional sobre irrigación puede ser una consideración crítica en esta etapa de la planeación. Como se indicó antes, la adopción de la irrigación extensiva con el propósito de mitigar la pobreza de las zonas rurales determina, conjuntamente con otros factores, el sistema y las reglas para la distribución equitativa del agua.
386. Además de las consideraciones socioeconómicas del país, los factores del manejo del agua para nuevos proyectos caen en dos categorías: físicas y administrativas. Para proyectos en operación, además de lo anterior, es importante considerar la rehabilitación de la infraestructura construida.
387. Existen por lo menos siete factores físicos que se mencionan a continuación, relativos al manejo del agua: el patrón de abastecimiento de agua, la calidad del agua, las condiciones climáticas y de lluvia, las propiedades físicas de los suelos, el tipo de cultivo, la topografía y el tamaño del área.
388. El primero y más crítico es el patrón de abastecimiento de agua, es decir, la variabilidad diaria y estacional del gasto. Es el mayor determinante en la selección de los objetivos de operación del proyecto que son: equidad, confiabilidad, oportunidad, eficiencia y flexibilidad.
389. Si el abastecimiento de agua es sumamente variable e impredecible, el único objetivo práctico a establecer es el de la distribución equitativa. Este puede ser el caso de los proyectos localizados a lo largo del cauce de un río,

especialmente aquellos en donde se utilizan obras de cabeza o captaciones donde el escurrimiento tiene una estrecha correlación con la variación de las lluvias.

390. Los objetivos del riego se pueden lograr totalmente en aquellos proyectos en los que se regula el agua a través de almacenamientos y el abastecimiento a las áreas de riego se hace directamente a través de ellos.
391. Este también es el caso en los proyectos de derivación directa que toman agua de algún río con régimen permanente y con un gasto capaz de cumplir una demanda de agua bien planeada en cualquier momento.
392. El segundo factor físico que debe considerarse es el de la calidad del agua y especialmente el relativo al contenido de sedimentos. El alto contenido de sedimentos puede aumentar considerablemente los costos de mantenimiento, si es que los canales se operan en condiciones de gasto variable. Este es uno de los factores cruciales que se tomaron en cuenta para seleccionar el tipo de operación "Abierto-Cerrado" en grandes proyectos a lo largo del cauce de algunos ríos en el sur de Asia.
393. El tercer factor físico por considerar es el clima...
394. ... y el patrón de lluvia. La variabilidad e intensidad de las precipitaciones pluviales requieren de flexibilidad en la operación de los sistemas de irrigación, con el fin de lograr una mayor eficiencia, especialmente en las zonas con escasez de agua.
395. El sistema debe ser capaz de responder rápidamente a una disminución repentina de la demanda, sin que se desperdicie mucha agua.
396. Para hacer uso óptimo de un gasto irregular y de las lluvias en grandes áreas de riego, y en aquellos casos en los que el embalse de almacenamiento se encuentra aguas arriba y lejos de la presa de derivación, se requiere de un sistema de comunicación para un control centralizado, así como de una buena capacidad de almacenamiento en el sistema de distribución.

397. Los siguientes factores por considerar son los suelos y los cultivos. La relación agua-suelo-planta es un aspecto importante para el manejo del agua a nivel de predio.
398. Los suelos arenosos y arcillosos tienen diferente índice de retención y capacidad de absorción del agua. Los suelos de texturas gruesas tienen una capacidad de retención de agua muy baja y capacidad de infiltración muy alta. Los suelos de texturas finas tienen una capacidad de retención de agua alta y un índice de infiltración bajo.
399. Para el ingeniero en irrigación las propiedades físicas de los suelos influyen en la decisión sobre la flexibilidad en la frecuencia, el gasto y la duración del riego. El tipo de suelo también influye en el método de riego a utilizar.
400. Otro factor importante en el diseño del sistema de irrigación es el cultivo que se va a regar. Por ejemplo, en los países del este de Asia, tanto el arroz como algunos otros cultivos se riegan, pero cada uno tiene requerimientos de agua diferentes.
401. Además, los cultivos tienen requerimientos variables de agua dependiendo de la etapa de crecimiento en que se encuentren y también de los factores climatológicos.
402. Por ejemplo, el arroz requiere de un gasto considerable durante la preparación de la tierra. Este gasto se da a los predios de manera secuencial. Sin embargo, durante la etapa de crecimiento, es con frecuencia preferible un riego continuo, el cual es a menudo la forma más práctica de mantener una lámina adecuada de agua en los arrozales.
403. En Malasia se han desarrollado simples pero ingeniosas compuertas para satisfacer dos diferentes requerimientos de riego en el arroz.
404. El exceso de agua no tiene ningún impacto en el rendimiento del arroz, siempre y cuando el nivel del agua pueda ser controlado a través del drenaje parcelario.

405. Por otra parte, los cultivos que no se riegan por inundación tienen un patrón de requerimientos diferente. El riego se proporciona a intervalos variables.
406. Los cultivos de riego requieren de una buena programación de frecuencia, gasto y duración para la correcta aplicación del agua, con el fin de obtener una producción óptima. Tanto los excesos como los déficits afectan los rendimientos.
407. Los tipos de cultivo y de suelos, las prácticas agrícolas y las consideraciones económicas, definen el método de riego a usar, pudiendo ser métodos por gravedad.
408. ... o métodos a presión, tales como el riego por goteo o por aspersión.
409. La conclusión importante para el diseñador es que el sistema deberá proporcionar el riego con suficiente flexibilidad en la operación y en el suministro del agua. Esta flexibilidad es necesaria para adaptar las necesidades de los diferentes cultivos con el método de riego.
410. La topografía es otro factor importante para decidir la forma de riego. Por ejemplo los terrenos ondulados y poco profundos pueden ser inadecuados para el riego por gravedad.
411. La topografía afecta el diseño del sistema en diferentes maneras. El control aguas abajo no resulta económico para canales con pendientes de más de 25 centímetros por kilómetro.
412. El último factor físico es la dimensión del proyecto. El control centralizado es el método más práctico y efectivo para grandes canales que conducen el agua a lo largo de cientos de kilómetros. Un control local estático sencillo es el adecuado para sistemas pequeños.
413. A continuación revisaremos los factores administrativos que deben tomarse en consideración.

414. Los factores administrativos más comunes incluyen: la operación efectiva del sistema con un costo mínimo, la facilidad de operación, la participación de agricultores y la tradición de riego.
415. En aquellos países en los que la mano de obra es muy costosa, debe minimizarse el personal de operación, haciendo el sistema lo más automático posible.
416. En los países en los que la capacidad técnica es limitada, la operación debe ser lo más sencilla posible, especialmente en aquellas tareas rutinarias realizadas por los operadores en el campo. Hay que evitar el frecuente reajuste de la medición en estructuras así como otros procedimientos complicados.
417. En ambos casos, el objetivo es realizar el control de los canales con el mínimo de personal.
418. Para el método de control mediante sistemas de comunicación modernos y computadoras, es absolutamente indispensable contar con personal técnico bien capacitado y de alto nivel, tanto para las tareas involucradas en la operación como en el mantenimiento.
419. Por ejemplo, los electricistas deben ser capaces de realizar reparaciones rápidas en el lugar mismo del desperfecto.
420. La necesidad de promover organizaciones agrícolas es un aspecto institucional que se discute con frecuencia en relación con la administración del agua. Este es un factor muy importante para la distribución de la misma a nivel predio.
421. En las áreas donde existe una larga tradición de riego, los agricultores tienen una buena disposición para cooperar y han desarrollado un conocimiento invaluable en riego. Sin embargo, en los sistemas de irrigación nuevos, la cooperación por parte de los agricultores no es espontánea.

422. Un sistema que suministre gastos confiables a las unidades terciarias servirá de base para una distribución equitativa del agua a los agricultores y promoverá su participación en las labores de operación y mantenimiento del sistema terciario.
423. Uno de los principales objetivos de un sistema es el de asegurar el suministro de agua a las unidades terciarias. En el pasado, este objetivo se descuidó en algunas ocasiones, dando énfasis a la participación del usuario y al manejo del agua a nivel de predio, sin tomar en consideración la posibilidad de una operación deficiente del sistema aguas arriba. Por ejemplo, se dan casos en los que un canal terciario sólo puede abastecerse cuando el canal secundario se encuentra a su máxima capacidad, sin que haya sido ésta la intención durante la etapa de planeación del proyecto. De hecho, se suponía que el sistema debería operar con gastos variables, para lo cual se hubiera requerido la construcción de más estructuras reguladoras transversales.
424. Al planear un sistema es importante tomar en consideración el conocimiento y la participación de los agricultores. Esto es importante para la selección del método de riego y el patrón de cultivos o, por ejemplo, cuando se adoptan nuevos sistemas y métodos de cultivo en el predio. Es necesario durante la etapa de diseño del proyecto, discutir y acordar con los agricultores, para ajustar los derechos de uso de agua establecidos en el mismo.
425. A continuación revisaremos los problemas especiales que surgen al hacer mejoras en la infraestructura de sistemas ya existentes. Los principios para mejorar el diseño y la operación de estos sistemas pueden ser los mismos que se consideran para los sistemas nuevos. Sin embargo, la realización de mejoras físicas en los primeros, es más difícil de llevar a cabo.
426. Las restricciones y limitaciones inherentes a los sistemas ya existentes, deben ser identificadas, evaluadas y eliminadas proyecto por proyecto. Para algunos sistemas las mejoras significativas pueden no ser técnica o económicamente posibles.
427. En algunos casos la investigación puede ser necesaria para identificar las formas más económicas de incorporar mejoras a los conceptos de control dentro de una red amplia de

canales en sistemas existentes para alcanzar los mayores requerimientos de una agricultura moderna bajo riego. Por ejemplo, una estructura puede convertirse en un regulador transversal compuesto construyendo un vertedor pico de pato orientado hacia aguas arriba a través de las dos entradas e instalando compuertas en las otras dos.

428. El control aguas abajo puede no resultar económicamente factible bien sea porque las pendientes del canal son excesivas o porque es impráctico elevar las bermas del canal para salvar obstáculos tales como: árboles, casas u otras instalaciones.
429. También puede resultar no práctico o antieconómico reemplazar importantes estructuras de control ya existentes, que están equipadas con compuertas anchas de tipo convencional, radial o deslizantes, por equipo hidromecánico automático.
430. Revisemos ahora algunas recomendaciones generales. Como hemos visto, existe una gran variedad de conceptos modernos y tecnologías asociadas a ellos, pero no hay un sólo concepto o tecnología que sea apropiado para todos los diferentes tipos de proyectos de irrigación.
431. El diseñador deberá buscar la tecnología apropiada para lograr una operación sencilla.
432. Otro principio importante en el proceso de diseño es obtener la máxima ventaja de la regulación hidráulica.
433. La regulación hidráulica proporciona una solución segura y confiable al problema de control del canal. Ofrece una gran sencillez en la operación, un alto grado de automatización y no depende de una fuente externa de energía. Lo que es más, requiere de una capacitación mínima al personal.
434. El diseño de proyectos de derivación directa puede basarse en el reparto de las aguas en forma proporcional a las áreas que abastece cada subsistema. También se pueden añadir almacenamientos para proporcionar una mayor flexibilidad en la aplicación del agua.

435. En los nuevos sistemas que cuenten con un suministro de agua confiable, el control aguas abajo puede ser una solución para los canales principales, siempre y cuando la pendiente del canal sea adecuada. El control aguas arriba puede combinarse convenientemente con un sistema de control aguas abajo.
436. Las pequeñas estructuras estáticas, que permiten tener un tirante o descargas de agua constantes, se pueden usar en el diseño de canales secundarios y terciarios.
437. La solución más conveniente para canales muy largos y grandes es el control centralizado con un sistema de monitoreo remoto o automático computarizado. La regulación hidráulica se puede usar para controlar las bifurcaciones en canales y canales menores de estos grandes sistemas.
438. Para mejorar la red principal a través de la modernización de los sistemas ya existentes, la única solución práctica, es generalmente, automatizar las compuertas e introducir alguna forma de control centralizado, además de llevar a cabo los trabajos convencionales de reparación y mejoras de las estructuras.
439. El sistema de distribución, que frecuentemente requiere de una rehabilitación completa, puede mejorarse eliminando estructuras obsoletas e introduciendo algunas más sencillas que permitan una mejor operación.
440. Al igual que los otros métodos de control, la operación automática del canal, de la que hemos hablado, también tiene limitaciones. Algunos equipos automáticos son más vulnerables al vandalismo y pueden provocar mayor interferencia que los sistemas convencionales de compuertas en las que se usan candados de seguridad. Como ya antes mencionamos, el alto contenido de azolves es una limitante importante para que los canales operen con gastos variables. En algunos sistemas y bajo ciertas condiciones, la automatización puede resultar poco recomendable; en otros casos, la automatización se limita a unas cuantas estructuras de control, por ejemplo, cuando hay pequeñas variaciones en la demanda en países áridos o semiáridos o donde la operación de los canales se basa en un programa de "abierto-cerrado".

441. Para el diseño de los sistemas de riego que utilizan los conceptos y las técnicas que se discuten aquí, es necesario llevar a cabo estudios más elaborados sobre hidráulica durante la etapa de diseño; asimismo, se requiere de un intenso programa de capacitación para la mayoría de los diseñadores. También es necesario que se tenga especial cuidado durante la construcción para asegurar la adecuada instalación de las estructuras de control.
442. Una pregunta que surge frecuentemente es la del costo de estos sistemas modernos. Un sistema de control eficiente, representa menos del 10 por ciento del costo total del proyecto.
443. El costo adicional de un sistema de control moderno sobre el de uno convencional puede representar tan sólo un pequeño porcentaje del costo total.
444. La principal razón es que la mejor eficiencia y la mayor seguridad proporcionada por un sistema de este tipo, generalmente reduce los requerimientos de obras civiles. Esto resulta en ahorros en los costos de construcción. Se requieren canales con una menor capacidad para dar servicio al mismo programa agrícola, si la eficiencia global puede incrementarse de un 40 a un 50 por ciento. En este caso sería necesario un bordo libre menor y podrían eliminarse también los terraplenes de seguridad.
445. Por ejemplo, se puede obtener un canal de control centralizado, diseñado con bordo libre mínimo y sin terraplenes de seguridad.
446. Los costos de un sistema moderno deben ser comparados con los beneficios derivados de una buena administración del agua. Usaremos como ejemplo el proyecto Doukkala, en Marruecos. Actualmente la eficiencia del sistema de conducción es alta, aproximadamente del 75 por ciento, entre las obras de cabeza y las tomas granja.
447. La administración es también muy eficiente. La cantidad de personal para la operación, alrededor de uno por cada 300 hectáreas, es bajo comparado con el de otros sistemas convencionales con el mismo tamaño promedio de predio y el mismo servicio de agua a los agricultores.

448. Se ha logrado un alto nivel de eficiencia en la operación, proporcionando al mismo tiempo un buen servicio a cada uno de los agricultores. Las tarifas por derechos de agua se calculan con base en el volumen y después de un incremento en estas se cubren los costos de operación y mantenimiento.
449. La venta de los productos agrícolas a las agroindustrias permite cobrar el 100 por ciento de las tarifas por derechos de agua. Esto se debe a que éstas se deducen directamente de los precios que se pagan a los agricultores por sus productos. Este cargo por riego, se traspasa frecuentemente de la industria procesadora a la agencia responsable de la irrigación.
450. El principal factor de éxito del sistema ha sido el uso de un equipo moderno para control del agua. Esto permite que la administración se concentre en aspectos relativos a la producción agrícola, como lo son las organizaciones de agricultores y la asistencia técnica...
451. ... y a suministrar a los agricultores insumos en aquellas áreas donde el riego fue introducido recientemente.
452. Todos los sistemas aquí descritos han trabajado exitosamente durante varios años. Cuando éstos se combinan con un manejo apropiado de los canales, proporcionan al usuario final....
453. ... el agricultor, un suministro de agua manejable y confiable, que constituyen soluciones a los problemas de la agricultura con riego.
454. FIN DE LA PARTE VII

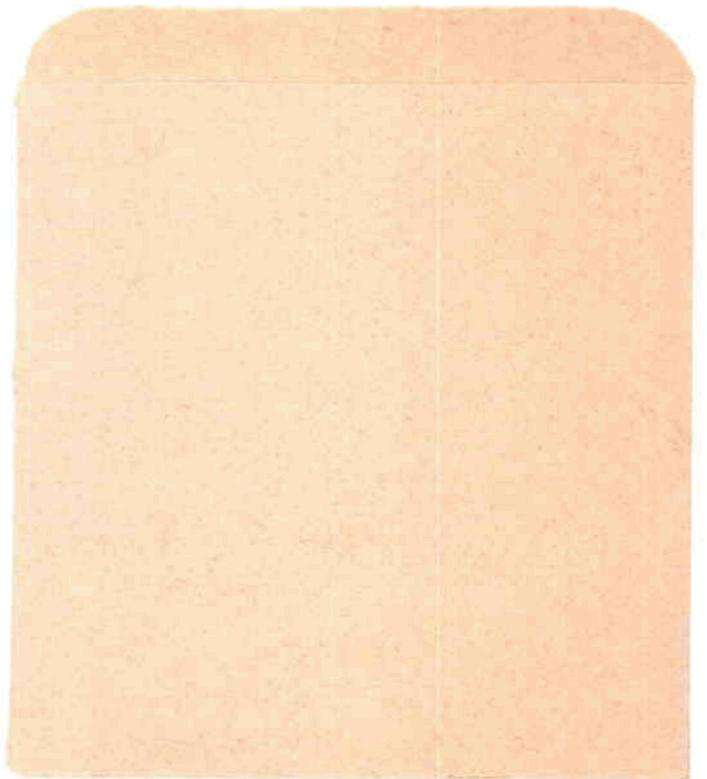
Mejoramiento de la operación de los sistemas de riego por gravedad, se terminó de imprimir en el mes de octubre de 1990, en los talleres de Impresores de Morelos, S.A., Calle Ronda 16, Col. Acapantzingo, Cuernavaca, Morelos. La edición consta de 1,000 ejemplares.



42417

IMTA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA





42417

IMTA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA