

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Uso eficiente del agua en cuencas.
<i>Autor / Adscripción</i>	Jaime Collado Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 13(1): 27-49
<i>Fecha de publicación</i>	1998
<i>Resumen</i>	La demanda de agua aumenta con el crecimiento de la población y de las actividades socioeconómicas. Esto plantea el problema de usarla eficientemente. También incluye su aplicación apropiada en cada uso, la administración del aparato institucional que la maneja, la apropiación de mejores tecnologías de planeación, asignación y manejo, y la asimilación de una nueva cultura del agua. En este trabajo se propone una definición de uso eficiente del agua en cuencas y se exploran las condiciones bajo las que se puede presentar. Se abordan diversos aspectos que inciden en el manejo de cuencas, la planeación integrada de los recursos hidráulicos y en la instrumentación de un sistema de asignación de agua.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1275">http://hdl.handle.net/123456789/1275</a>

# Uso eficiente del agua en cuencas

Jaime Collado

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*La demanda de agua aumenta con el crecimiento de la población y de las actividades socioeconómicas. Esto plantea el problema de usarla eficientemente, lo que va más allá del ahorro en el consumo. Involucra definir en la arena política los usos que la sociedad considera más benéficos. También incluye su aplicación apropiada en cada uso, la administración del aparato institucional que la maneja, la apropiación de mejores tecnologías de planeación, asignación y manejo, y la asimilación de una nueva cultura del agua. En este trabajo se propone una definición de uso eficiente del agua en cuencas y se exploran las condiciones bajo las que se puede presentar. Se abordan algunos aspectos físicos, químicos, biológicos, tecnológicos, económicos, políticos, sociales, institucionales y operativos que inciden en el manejo de cuencas, la planeación integrada de los recursos hidráulicos y en la instrumentación de un sistema de asignación de agua. Se concluye que el uso eficiente del agua no es un estadio al que deba llegarse, sino más bien una actividad permanente y flexible para buscar el mayor bienestar posible en función de la asignación del agua.*

**Palabras clave:** planeación del agua, planeación integrada de recursos del agua, manejo del agua, uso eficiente del agua, conservación del agua, asignación del agua, sistemas de planeación y análisis de recursos del agua.

## Introducción

El concepto *uso eficiente del agua* es mucho más amplio que el bien establecido de *conservación del agua*. Este último se define como cualquier reducción benéfica en el uso o en las pérdidas de agua (Baumann, *et al.*, 1984), y corresponde principalmente a la dimensión física del uso eficiente del agua, es decir, a la habilidad de lograr un producto o servicio para ahorrar agua o reducir su pérdida. Sin embargo, al depender el ahorro tan fuertemente de la tecnología disponible —la que a su vez cambia de cuando en cuando y de región a región— ésta lo conduce hacia la dimensión tecnológica del uso eficiente del agua. Aún más, las consecuencias ambientales del uso productivo, centrado en satisfacer los requerimientos públicos indispensables, amenazan al desarrollo sostenible; por tanto, considerar a la calidad del agua como elemento relevante, es un paso obligado para alcanzar la eficiencia global en su uso. Igualmente, el recurso juega un papel importante en el bienestar de la sociedad, actuando como un catalizador que puede realzar o atenuar la calidad de vida, de acuerdo con su uso apropiado o ineficiente.

Por último, y no por esto menos importante, existe una dimensión económica en el uso eficiente del agua

donde se reconoce como un bien social, *i.e.*, el agua es un bien público cuando se trata de pequeñas cantidades para satisfacer las necesidades humanas básicas, pero en grandes volúmenes se comporta como un bien privado.

La finalidad de cualquier política hidráulica es obtener del agua el mayor bienestar social posible. Sin embargo, el concepto de bienestar es ilimitado y difícil de cuantificar para servir como un punto de referencia para medir el progreso; por tal motivo, en general se adoptan como objetivos aspectos particulares del bienestar (Cox, 1989). La eficiencia económica, como meta, tradicionalmente ha atraído la atención de analistas de sistemas de aprovechamientos hidráulicos, principalmente por su concreción operacional, pero el aumento en la producción nacional de bienes y servicios, como resultado de actividades relacionadas con el agua, no asegura el aumento del bienestar social en todas sus dimensiones, ni el mejoramiento de su distribución. Aún más, el agua es un ingrediente necesario pero no suficiente para el crecimiento económico. Este es un hecho histórico señalado tempranamente por Hall y Dracup (1970).

Entonces, si la sola presencia del agua no es suficiente para inducir el crecimiento económico nacional,

es todavía menos probable que pueda incrementar el bienestar de un país. Claramente, si el agua debe propiciar el bienestar nacional tiene que interactuar con otras actividades relacionadas con los recursos naturales, con medidas administrativas y herramientas de instrumentación, con infraestructura, capacidad y arreglos institucionales y organizativos, y con la definición de objetivos nacionales a través de políticas públicas; de tal manera que estas acciones interrelacionadas persigan la calidad de vida que la sociedad ha preferido y plasmado en un plan nacional hidráulico.

La sinergia de las actividades relacionadas con el agua –incluyendo sus dimensiones técnica, ambiental, social y económica– con las de planeación, manejo y desarrollo de infraestructura resulta en un plan hidráulico cuyo análisis requiere métodos de planeación integrada para instrumentar acciones y obtener los beneficios derivados de la operación de proyectos específicos. Ese plan representa todas las decisiones relativas a la interacción de la sociedad con los recursos hidráulicos, incluyendo política y legislación hidráulica, desarrollo de la capacidad institucional, acuerdos intergubernamentales, mecanismos para la resolución de conflictos, recolección, análisis y difusión de datos, programas de investigación y de desarrollo, pronóstico de condiciones futuras, planeación hidráulica, asignación de agua, financiamiento de actividades propias del manejo de agua, infraestructura física, redistribución del agua, estructura administrativa, comunicación entre usuarios y autoridades, protección de ecosistemas seleccionados y de la calidad del agua, mejoramiento del conocimiento y de la conciencia así como promoción de los sentidos de propiedad y responsabilidad de los usuarios, y educación y entrenamiento. De esta manera, un plan hidráulico contiene no sólo múltiples objetivos, sino también múltiples usos sectoriales, e involucra a decisores en diversos niveles de la estructura política y de los estratos socioeconómicos. Por tanto, para garantizar el sostenimiento de un plan hidráulico, Bamberger y Cheema (1990) proponen cuatro condiciones básicas:

- Continuidad en la entrega de servicios y en la producción,
- Mantenimiento de la infraestructura física,
- Desarrollo de la capacidad institucional a largo plazo y
- Apoyo político.

Cuenca es la unidad física donde se desarrollan muchas actividades hidrológicas, biológicas, económicas, y sociopolíticas (Easter, *et al.*, 1986; *International Hydrological Programme*, 1991). El impacto de las

prácticas de uso del suelo en las partes altas de la cuenca sobre los recursos de su parte baja son un área problemática: típicamente, no sólo diferentes organismos son responsables de diferentes partes de la cuenca y del manejo de distintos recursos, sino que los habitantes de las tierras altas no están motivados para tomar en cuenta los costos que, a consecuencia de sus acciones, imponen a los residentes de las tierras bajas. Esto requiere traducir los fundamentos de uso del agua y suelo en políticas efectivas y en innovaciones institucionales para vencer las barreras tradicionales de cooperación entre organismos, y así manejar las actividades de la cuenca desde una perspectiva global (Kleinspehn y Paola, 1988; Le Moigne, *et al.*, 1994). Los usos del agua en una cuenca varían desde actividades económicas como producción forestal, minería y usos industriales, agricultura, pastoreo, pesca, electricidad y transporte, hasta actividades relacionadas con el ambiente como protección forestal, conservación de ecosistemas seleccionados, incremento del gasto base en ríos y preservación de la belleza escénica, incluyendo la satisfacción de las mínimas necesidades humanas en áreas rurales y urbanas, y los menos esenciales pero también importantes usos como la arquitectura del paisaje y la recreación.

La lucha entre diferentes usos y usuarios por obtener agua plantea, entre otros, dos problemas: definir quién o quiénes son sus propietarios y el establecimiento de derechos para usarla (Melville y Peña, 1996). Como consecuencia del gran número de intereses para usar el agua y la facilidad con que pueden transmitirse los impactos de un uso a otro mediante los procesos hidrológicos, se necesita un conjunto de reglas que guíen en la resolución y prevención de conflictos. También, la necesidad de cambios en el uso del agua hacia aplicaciones más benéficas requiere un sistema de asignación de agua que tenga disposiciones para la terminación de derechos bajo ciertas condiciones, para el establecimiento de nuevos derechos y para la modificación y transferencia de derechos vigentes. Los derechos de agua definidos por el proceso de asignación, representan una seguridad legal para que los individuos puedan usar el agua bajo condiciones prescritas, establecidas en un plan hidráulico nacional. Estos derechos pueden ser otorgados a propietarios privados y a organizaciones públicas; esto último provee una oportunidad para prohibir o restringir usos del agua que representan extracciones adversas. Como la asignación de agua no es simplemente un proceso para crear nuevos derechos de agua sino que también involucra la supervisión continua de derechos, el concepto de uso eficiente del agua en cuencas puede ser definido como un problema de asignación, es

decir, la habilitación de la estructura institucional para manejar un sistema de asignación de agua.

Por tanto, puede decirse que el uso eficiente del agua en cuencas es un cuerpo interactivo de actividades, instrumentos, decisiones y políticas para lograr una asignación sostenible y económicamente eficiente de la cantidad y la calidad del agua entre usos y usuarios competitivos, con la finalidad de obtener del recurso el mayor bienestar social posible, preservando los derechos de generaciones futuras. En resumen, el agua es mucho más que un bien económico y el uso eficiente del agua es un concepto mucho más amplio que el de conservación del agua. A continuación, se abordarán los temas de manejo de cuencas, planeación integrada de los recursos hidráulicos y algunos lineamientos generales de un sistema de asignación de agua.

### Manejo de cuencas

Existe un cierto imperativo natural acerca de la fuerza de gravedad en una cuenca. El agua fluye hacia abajo y esto crea una fuerte dimensión unidireccional en las relaciones causa-efecto de las actividades relacionadas con el agua. El suelo, los nutrientes y los productos agroquímicos son transportados a través del agua. La gente puede mudarse en cualquier dirección dependiendo de diversos factores, como las oportunidades de empleo y de comercio, pero su migración probablemente está influenciada, al menos parcialmente, por la topografía de la cuenca. Aunque los recursos naturales fueran suficientes para satisfacer sin conflictos todas las demandas de una cuenca en un tiempo dado, el crecimiento de la población ejercería presión sobre las crecientemente escasas tierra y agua, para sostener un nivel de producción socialmente óptimo.

Si los recursos naturales de una cuenca se utilizan al libre albedrío, las tierras con agricultura extensiva cambiarán por agricultura intensiva, las tierras de agostadero serán cultivadas, las tierras de pastoreo tenderán a ser sobreexplotadas y la producción forestal sostenible puede provocar deforestación de las áreas altas debido a una extracción excesiva de madera (Carter y Dale, 1974). El efecto de todos estos cambios puede resultar en una erosión acelerada del suelo, en un suministro reducido de agua limpia, y en el incremento de la incidencia y severidad de inundaciones aguas abajo.

Algunas consecuencias de este arreglo *natural* de usos del suelo y del agua son una reducción en la productividad de bosques, pesquerías y de tierras agrícolas y de pastoreo; beneficios disminuidos en centrales hidroeléctricas y proyectos de irrigación; y pérdida

de propiedades y deterioro de la salud humana. Aunque las causas inmediatas de este escenario son provocadas principalmente por factores físicos, los problemas de una cuenca resultan de una mezcla de factores biofísicos, económicos, institucionales y políticos. Por tanto, un prerrequisito para lograr la planeación integrada de los recursos hidráulicos, y finalmente su manejo, es llevar a cabo un ordenamiento de la cuenca para explotar racionalmente el suelo y el agua, de acuerdo con su utilidad potencial derivada de su ubicación geográfica (Banco Mundial, 1994a).

### *Ordenamiento de cuencas: la dimensión física*

El ordenamiento de una cuenca persigue la mayor ventaja en la utilización de los recursos naturales, reteniendo las actividades deseadas y requeridas en los mejores lugares para cada uso de tierra y agua. Para ello:

- Se subdivide el área de la cuenca en unidades con igual potencialidad para ciertos usos, y se clasifican diferentes regiones de acuerdo con su adaptabilidad para usos alternativos del suelo.
- Se identifican las principales actividades de uso del suelo, tanto existentes como posibles, por ejemplo, agricultura, pastoreo, agrosilvicultura, protección y comercialización forestal, minería, hidroelectricidad, urbana, transporte, pesquerías, recreación forestal y embalses, y preservación de ecosistemas naturales.
- Se equiparan la capacidad de la tierra y la disponibilidad de agua con las necesidades identificadas, y así se definen áreas apropiadas para distintos usos de la tierra y del agua.

Con la finalidad de lograr diversas metas en conflicto, deben combinarse los usos productivos y protectores de los recursos naturales. La correspondencia final entre los usos de la tierra y del agua debe balancear la utilización local y externa de los recursos para proveer sustento y ganancia, y evitar las externalidades económicas entre los usuarios de los recursos o los residentes de la misma cuenca.

Los beneficios económicos y estratégicos de las actividades productivas en una cuenca son evidentes, aunque la transferencia indebida de problemas a los habitantes de aguas abajo no son claramente evadidos o incluso reconocidos por los usuarios de aguas arriba.

Cada actividad tiene un cierto impacto en la conservación del suelo y del agua; por tanto, una actividad se alentaría si emplea prácticas apropiadas para esos recursos y se desanimaría en caso contrario.

Alternativamente, si las consecuencias adversas pueden reducirse o mitigarse se buscaría eso alterando la práctica. En todo caso, se deben evaluar primero los efectos del cambio en términos biofísicos, y después evaluar si hay beneficios o costos netos para el usuario de la tierra, para sus vecinos y especialmente para las comunidades ubicadas aguas abajo. De este modo se puede establecer la aceptación, el rechazo o la modificación de opciones específicas de uso del suelo.

Algunos de los resultados adversos más serios en una cuenca debidos a usos incompatibles de tierra y agua son la erosión local del suelo, la sedimentación dañina fuera del sitio donde se tiene una práctica inapropiada, la disminución en el volumen total de agua, la alteración de la distribución del escurrimiento, el decremento de los niveles freáticos y la contaminación del agua por productos químicos y materias orgánicas.

Debe enfatizarse que el término *contaminación del agua* implica daños asociados con el deterioro de la calidad del agua, mientras que el término *deterioro de la calidad del agua* significa que un desperdicio puede ser descargado en una corriente de agua sin causar daños severos a usos posteriores.

#### *Normas de uso del agua: la dimensión de calidad*

Con la creciente población y el incremento en la producción de bienes y servicios, hay un aumento constante en la generación y descarga puntual y difusa de desperdicios que impactan a la calidad de los cuerpos receptores de agua. Bajo estas circunstancias pueden ser necesarios diferentes tratamientos, e incluso bajo condiciones naturales el agua puede requerir una modificación para ciertos usos. Los parámetros y los rangos que determinan la calidad del agua son muy variables, ya sean para uso doméstico, agrícola, industrial, estético, recreativo o hidrobiótico.

El agua para uso doméstico debe adherirse a las normas de calidad del agua potable que limitan la turbiedad y el color, los tóxicos orgánicos e inorgánicos, la radiactividad alfa y beta, y la densidad de coliformes totales y fecales; el agua para agricultura debe satisfacer una combinación de sólidos disueltos totales, conductividad específica, concentraciones de sodio y boro, temperatura y parásitos patógenos; en la industria, la dureza, el pH, la temperatura y los sólidos disueltos totales forman la base para especificar las concentraciones máximas, de acuerdo con diversos usos tales como procesamiento, calentamiento, enfriamiento o propósitos sanitarios; los usos estéticos requieren agua sin sustancias flotantes o suspendidas, colores objetables y olores desagradables, y concentraciones

elevadas de oxígeno disuelto; y, para actividades recreativas que involucran el contacto con el agua, ésta no sólo debe ser estéticamente agradable sino que debe estar exenta de sustancias tóxicas o irritantes y libre de organismos patógenos.

La determinación del efecto de descargas de desperdicios en la vida acuática es muy complicada. El impacto de la descarga de una sustancia en particular sobre la vida de la micro y macro biota varía con la composición física y química del agua. Las descargas de desechos pueden provocar temperaturas altas, acidez o alcalinidad excesivas y concentraciones bajas de oxígeno disuelto que aumentan la sensibilidad de los organismos a sustancias tóxicas, y en circunstancias extremas pueden incluso aniquilarlos. La influencia combinada de varias sustancias actuando simultáneamente puede causar más daños para la vida de los organismos que la suma de los efectos individuales tomados de manera independiente. Recíprocamente, ciertas combinaciones de sales actúan antagónicamente y reducen el efecto nocivo que pudiera ocurrir si cada una actuara en forma aislada.

Se estima que el factor más importante para determinar la tolerancia de la vida acuática a la concentración de diversas sustancias en una etapa dada del ciclo de vida, es la relación entre el tiempo y la concentración. Así, mientras una sola exposición de altas concentraciones a corto plazo puede no mostrar efectos de daño, exposiciones repetidas de la misma concentración o una exposición continua a una concentración mucho más baja puede afectar crónicamente o incluso eliminar algunos organismos. Sin embargo, bajo una exposición gradual, muchos organismos pueden desarrollar tolerancia a concentraciones que de otra manera serían tóxicas. Más aún, diferentes patrones de concentración temporal y espacial de una sustancia descargada en un cuerpo de agua, pueden tener efectos significativamente distintos en la vida acuática.

Generalmente se considera que una descarga de lodo, con su repercusión asociada en la calidad del agua, es más peligrosa que una descarga uniforme y constante con una mezcla adecuada en el cuerpo receptor de agua; sin embargo, esto no necesariamente es verdadero. Si el cuerpo de agua se recupera rápidamente de una descarga de lodo, los peces y otros organismos acuáticos pudieran no sufrir tanto como sería el caso con una descarga constante de desechos con menor concentración. En los lugares donde las características hidráulicas del cuerpo de agua da como resultado concentraciones variadas a través de una sección transversal o en dirección longitudinal, los peces pueden evitar o alejarse de las concentraciones localmente altas.

Otro aspecto que debe tomarse en cuenta es que los peces pueden ser vectores de transmisión de contaminantes y microorganismos patógenos. Asimismo, un factor importante en la recontaminación de cuerpos de agua es la presencia de sedimentos, cuyas sustancias tóxicas pueden ser resuspendidas o redisueltas por la acción de corrientes de densidad, movimientos convectivos o por cambios en el pH o temperatura del agua. Como si todo esto no fuera suficiente, el problema se complica aún más por el hecho de que no todas las descargas de desperdicios resultan adversas para la vida acuática. Un nivel modesto de descargas domésticas puede beneficiar las aguas de pesca debido a que promueve el crecimiento de algas, las cuales, a su vez, entran a la cadena alimenticia. Similarmente, bajo algunas condiciones, las descargas térmicas pueden mejorar el entorno para la vida acuática incrementando la temperatura del agua durante los periodos de invierno.

Por lo general deben tomarse en cuenta las interdependencias que existen entre el manejo de la calidad del agua, el manejo de los recursos hidráulicos, el manejo del uso del suelo y la disposición de desperdicios, si se desea instrumentar un manejo efectivo y eficiente de la cuenca (Haith, 1982). Por ejemplo, las operaciones hidroeléctricas, especialmente en horas pico, y la regulación de corrientes mediante una serie de presas bajas para navegación, frecuentemente tienen un efecto adverso en la capacidad asimilativa de las aguas receptoras. La ubicación de un parque industrial y sus efluentes inmediatamente aguas arriba de una obra de toma para agua municipal, o a lo largo de una corriente de alto valor recreacional, puede crear costos que sobrepasan los beneficios de la nueva industria. Quemar desperdicios en vez de descargarlos en las corrientes puede mejorar la calidad del agua a costa de deteriorar la del aire.

Por tanto, se requiere determinar la calidad que debe mantenerse en cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos, y el grado de certidumbre con que se desea el nivel especificado de calidad del agua. También, es necesario concebir un conjunto de disposiciones para lograr el patrón especificado de calidad del agua. Las acciones individuales para cumplir con las normas de descarga incluyen principalmente la reducción de desperdicios por medio del cambio en los procesos, recuperación de materiales, producción de subproductos, tratamiento de desperdicios y combinaciones de éstas.

Las acciones colectivas para reducir cobros por efluentes son el resultado de economías de escala sustanciales para ciertos procedimientos de mejoramiento de la calidad del agua, tales como el trata-

miento en grandes plantas regionales donde se concentran los desperdicios de numerosas industrias y municipios, y el tratamiento de la corriente misma a través de lagunas de oxidación o mediante reaeración mecánica.

El manejo eficiente de la calidad del agua a escala regional requiere de un sistema que, incorporando las economías de escala disponibles, sea planeado y operado a través de algún arreglo cooperativo o colectivo, o por alguna autoridad pública, lo cual conduce a la interrogante de cuál es la mejor estructura institucional u organizativa para manejar la calidad del agua (Knesse y Bower, 1968, Banco Mundial, 1994b). La definición del nivel de calidad del agua que debe obtenerse y la combinación óptima de medidas para lograrla, serán de beneficio nulo si no existe una organización, institución o agencia adecuada para instrumentar el sistema y llevar a cabo las actividades involucradas en el manejo de la calidad del agua, dentro del contexto de un manejo integrado de los recursos hidráulicos.

#### *Pronósticos: la dimensión tecnológica*

Debido a fallas para prever o reconocer tendencias tecnológicas, muchos problemas que enfrenta ahora el manejo de cuencas parecen peores de lo que pudieron haber sido. Todas las tendencias que reflejan las actividades humanas están interrelacionadas; por consiguiente, la habilidad para pronosticar en un área depende de la habilidad para prever cómo las tendencias en otras áreas pueden influenciarla.

La dependencia de un pronóstico en otros es, por supuesto, desanimante para muchos especialistas que descubren la insuficiencia de su propia experiencia para proyectar apropiadamente las tendencias del tema con el que están tan familiarizados. Sin embargo, no hay forma de reducir esta dependencia a través de la selección de metodologías complejas y astutas, ya que es inherente a la interdependencia entre las actividades sociales. La importancia de cada componente que depende de un pronóstico antecedente en particular, está medida por su contribución proporcional al agregado. Por ejemplo, en el caso del pronóstico de la demanda de agua, el uso agrícola tiene un peso mucho mayor que el uso residencial; por tanto, un error en el pronóstico de un impacto tecnológico o incluso de una innovación significativa en el uso del agua para la agricultura, tendría consecuencias mucho más serias que un error en el pronóstico de dispositivos ahorradores de agua para uso doméstico.

La expresión del mejoramiento tecnológico debe ser en función de la capacidad funcional más que en con-

figuraciones o invenciones específicas (Ascher, 1978). Si se predicen invenciones específicas más que capacidades, las implicaciones del progreso tecnológico pueden perderse debido a la falla para capturar el desarrollo de invenciones paralelas que sirven para las mismas funciones. Por tanto, se requiere percibir qué aparatos y técnicas podrán lograr ciertas tareas de ahorro de agua, que a su vez permitan mejorar las actividades del manejo de la cuenca y finalmente del uso eficiente del agua.

Otra característica deseable de los pronósticos tecnológicos es que especifiquen explícitamente el tiempo en que se producirán las innovaciones. Los pronósticos de capacidades específicas obviamente pierden importancia tan pronto como las invenciones involucradas se concretan o son sobrepasadas por pronósticos con innovaciones superiores. Por ejemplo, las predicciones del desarrollo de métodos de desalación competitivos con métodos convencionales de suministro de agua dulce, serán obsoletas una vez que las innovaciones se vuelvan realidad o después de que se vislumbren mejores medios para lograr los mismos fines. Esto no significa que pronosticar algún impacto tecnológico no tiene importancia; significa que existe una utilidad limitada en refinar una técnica de pronóstico tecnológico que se centra en una aplicación específica.

La implicación subyacente es que la asignación de agua en un tiempo dado depende de la tecnología disponible para lograr las actividades relacionadas con el agua en una cuenca, lo cual conduce a un cierto nivel de eficiencia en el uso del agua. Cuando un nuevo desarrollo tecnológico está disponible para ahorrar agua efectivamente, la asignación del agua puede ajustarse para mejorar aún más el bienestar social. En consecuencia, el uso eficiente del agua no es un estado al cual deba llegarse, sino más bien una actividad permanente y flexible para buscar el mayor bienestar posible en función de la asignación de agua.

#### *Incentivos: la dimensión económica*

Así como hay una lógica natural en una cuenca, derivada de procesos físicos y de su uso como unidad organizativa, existe también una fuerte lógica económica para concebir una cuenca como unidad analítica. Esto proviene del flujo de factores físicos y del hecho de que las acciones en una parte de la cuenca pueden tener efectos en otra parte de la misma.

El concepto económico que abarca estas interrelaciones es el de externalidades, definido generalmente como la situación donde parte de los beneficios o de los costos de una acción son externos para quien toma

la decisión, *i.e.*, parte de los beneficios se destinan o parte de los costos se imponen a personas que no toman parte en la decisión (James y Lee, 1971; Haimés, 1981). Externalidades negativas o costos para usuarios ubicados aguas abajo pueden existir cuando prácticas de cultivo inapropiadas en la parte alta de la cuenca resultan en un incremento de la erosión y causan sedimentación en las tierras bajas, mientras que externalidades positivas o beneficios a los mismos usuarios en forma de erosión disminuida o nutrientes útiles en niveles bajos de sedimentación, pueden ser el efecto de una reforestación activa en la parte alta de la cuenca.

El papel de la economía en el ordenamiento de cuencas es internalizar las externalidades, por tanto, éstas tienen que ser primero identificadas y luego explícitamente incorporadas en la toma de decisiones. En virtud de que muchas acciones del manejo de cuencas se instrumentan en un lugar y pueden causar un cambio en otro sitio, no existe la relación directa causa-efecto que la teoría económica predice como conducente a una toma de decisiones eficiente. Por ejemplo, un programa de estabilización de pendientes en tierras altas puede estar diseñado para evitar sedimentación en una presa de almacenamiento aguas abajo y pudiera representar beneficios no medibles en las tierras altas, o insuficientes para cubrir los costos del proyecto. En este caso los beneficios son externos para el sitio del proyecto pero serían incluidos en un análisis más amplio de la cuenca, *i.e.*, el costo de oportunidad para lograr objetivos externos disminuye la eficiencia económica. Claramente, en esta situación aparecen dos puntos de vista:

- El análisis financiero, donde la perspectiva individual o privada considera solamente aquellos beneficios y costos que afectan directamente a la persona, pero las externalidades –por definición– no están incluidas en el análisis.
- El análisis económico, donde la perspectiva social considera los beneficios y los costos que afectan el bienestar de la sociedad, y lo que individualmente se consideraría una externalidad se incluye en el análisis.

Como el análisis económico de proyectos en cuencas incorpora un rango de impactos y externalidades más amplio que el análisis financiero, un plan económicamente atractivo puede ser financieramente desfavorable y tener una baja aceptación por parte de las personas que tienen que instrumentarlo. El plan de manejo de la cuenca incluye, sin embargo, muchos usuarios individuales a lo largo de corrientes, ríos y tie-

rras de dominio público; en consecuencia, si los resultados de los análisis de las dos perspectivas no se refuerzan, es decir, si un proyecto es social pero no privadamente benéfico, se requieren herramientas de instrumentación como por ejemplo los subsidios. Estas medidas buscan transferir recursos para hacer el plan lucrativo desde la perspectiva privada. Por tanto, en los proyectos de cuencas siempre hay una disyuntiva entre los beneficios aguas arriba o *in situ* y los daños aguas abajo o fuera del sitio.

Aun cuando la sociedad puede cosechar beneficios netos de un programa específico de manejo de una cuenca, el problema es que los costos y los beneficios involucran a distintas personas. Entonces, el análisis del programa necesita mostrar quién se beneficia y quién paga los costos de un proyecto. Esta información puede usarse para diseñar maneras de influenciar esa distribución. Los daños aguas abajo continuarán a menos que se desarrollen herramientas institucionales y de instrumentación que establezcan un nuevo conjunto de incentivos para que los usuarios aguas arriba adopten las prácticas deseadas.

#### *Conciliación de objetivos: la dimensión política*

Aunque la política hidráulica formal, incorporada en leyes y reglamentos, se crea a través de las acciones de cuerpos legislativos y funcionarios públicos, de las posturas de organismos gubernamentales y de resoluciones judiciales, una política hidráulica menos formal también se origina en la operación diaria de la infraestructura por entidades administrativas, en las actitudes y costumbres de los usuarios, y en el papel que juegan los profesionales en descubrir, definir y describir los problemas del agua.

Dado que el diseño de una política hidráulica se deriva de la articulación de la política para un desarrollo socioeconómico general y el manejo de una cuenca es sólo un elemento del desarrollo global, la política hidráulica debe integrarse a una política más amplia para garantizar consistencia y coordinación entre los diversos componentes del desarrollo. Esta integración incluye la aplicación de la política hidráulica para influenciar, e incluso cambiar, la política de desarrollo global.

El enfoque tradicional de maximizar el valor presente de las ganancias sujetas a restricciones ambientales ha resultado en la degradación o pérdida irreversible de los recursos naturales. Los enfoques desarrollados recientemente postulan el mejoramiento –ya que el objetivo es ilimitado– del entorno humano y natural, sujeto a un desarrollo sostenible. En el último caso se requiere, por ejemplo, establecer normas mínimas de

seguridad para ciertas especies, determinar el costo de oportunidad de esas metas, y determinar cuánta biodiversidad está dispuesta a pagar una sociedad, o incluso un grupo dentro de esa sociedad. La pregunta de cuál es el objetivo y cuál la restricción, es uno de los papeles centrales del diseño de políticas, e involucra la definición de interés e igualdad públicos, la determinación de normas y prioridades, la selección de niveles de organización y servicio, y la conciliación de objetivos políticos (Haimés, 1980, Born, 1989, Reuss, 1993).

La arena de la política hidráulica contiene abundantes preguntas de naturaleza técnica. Un grupo incapaz de entender los orígenes de los conflictos de la política hidráulica y los fundamentos de diversos argumentos en competencia, será sólo por ese hecho menos capaz de comunicar sus preferencias políticas, e incapaz de cuestionar y de sostener representantes formales para ejecutar acciones en relación con los puntos bajo discusión.

El papel de los usuarios del agua en un sistema político que persigue políticas con altos contenidos técnicos y científicos, puede observarse idealmente desde diferentes perspectivas (Pierce y Lovrich, 1986):

- La respuesta populista promueve la participación pública extensiva en el proceso político; se presupone que el público tiene la capacidad de adquirir y emplear información técnica de cierta complejidad para tomar decisiones importantes.
- La posición pluralista argumenta que es innecesario y quizá hasta inadecuado promover la participación general en el proceso político; más bien, los activistas –especialmente aquellos que representan intereses organizados– actuarán a favor de las preferencias de segmentos importantes de la comunidad.
- La postura elitista se basa en la creencia de que el público en masa es fundamentalmente ineducable e irracional; las consecuencias de una política científica y técnica son tan complejas y serias, que solamente a las personas bien informadas debe permitírseles participar directamente en el proceso de diseño de políticas.

Si la información técnica es indispensable para sostener una postura política adecuada, tener un conocimiento apropiado es todavía más importante. El conocimiento científico, como el agua, la tierra, el trabajo y el capital, es un recurso –de hecho un bien económico– y la habilidad para usar y controlar ese recurso tiene profundas consecuencias en la distribución del poder político asociado con el manejo de los recursos naturales de una cuenca.



Tener nociones científicas, ya sea como conciencia de desarrollos científicos relevantes, posesión de vocabulario científico y capacidad de razonamiento técnico, o habilidad para aplicar la ciencia con la finalidad de entender fenómenos naturales, son esenciales para tomar parte en discusiones públicas de problemas políticos y para proponer políticas gubernamentales alternativas. Sin embargo, si la familiaridad con la lexicología científica o incluso la habilidad para utilizarla correctamente no conducen necesariamente a un nivel de conciencia o interés por los desarrollos científicos sociales, mucho menos lo hacen para definir objetivos políticos.

La relación entre información y poder político es especialmente importante, sobre todo cuando se compara el déficit aparente en la información que poseen los ciudadanos con la que corresponde a personas activas en el proceso político. Aun así, el nivel público de información técnica parece tener una mínima influencia en el uso del agua. Aunque los usuarios, en comparación con activistas, expertos y legisladores, son menos capaces o están menos dispuestos, o ambas situaciones, para identificar problemas importantes de política hidráulica, poseen la habilidad para identificar problemas importantes relacionados con el uso del agua. Por tanto, como la participación en política hidráulica está relacionada con la familiaridad de términos técnicos, pero no necesariamente con la articulación o con el conocimiento de los mismos, es claro que el nivel de información técnica de un grupo puede ser crucial para comprender la esencia de los puntos en discusión y las soluciones propuestas, y para influir en los resultados de disputas políticas en relación a esos puntos.

#### *Tradición: la dimensión social*

La lógica inherente de una cuenca como unidad natural, económica y política para establecer procedimientos de planeación y manejo, es sólo parcialmente sustentada por el patrón de actividades humanas que se llevan a cabo en la cuenca. Esto es así porque muchas actividades humanas conectadas con la explotación del agua y el uso del suelo rural están influenciadas por factores esencialmente sociales tales como la cultura, la historia y la etnicidad (Wittfogel, 1957, Enge y Whiteford, 1989), que están sólo indirecta y parcialmente relacionadas con el entorno natural representado por la cuenca. Por consiguiente, muchos de los problemas que planeadores y administradores de cuencas deben abordar para lograr una exitosa instrumentación de planes, yace en la interfase de los dominios natural y sociocultural. Al igual que el ecosistema

natural, el sistema social también consiste de una cantidad de elementos interrelacionados, tales como demografía, organización social, economía, ideología e instituciones políticas. La interacción de estos componentes es la que determina en gran medida el carácter del sistema social, y tiene una considerable influencia en su estabilidad, elasticidad y desarrollo a través del tiempo.

El sistema social depende del sistema natural para allegarse los materiales básicos y la energía que requiere; un cambio en la disponibilidad de los insumos del sistema natural puede tener un tremendo efecto en la operación y viabilidad del sistema social. De manera similar, una modificación en el sistema social puede afectar y cambiar grandemente el sistema natural; este es frecuentemente el caso después de innovaciones importantes en tecnología o incrementos en la población.

Cada subsistema tiene un grado de autonomía, una dinámica propia que dentro de ciertos límites permite tanto el desarrollo independiente como la flexibilidad. Esta autonomía permite a cada subsistema resistir ciertos tipos y magnitudes de cambios provenientes de otros subsistemas o desde afuera. Las tecnologías adaptables, por ejemplo, permiten conservar gran parte de la integridad del sistema social frente a cambios ambientales considerables. La capacidad de los ecosistemas para resistir cambios es menos pronunciada, de aquí que la presencia de factores limítrofes en el ambiente pueda restringir o inhibir el desarrollo y la magnitud de los cambios que ocurren en el sistema social. A través del tiempo y de retroalimentación y mediante selección y adaptación, cada uno de los dos subsistemas moldea y es moldeado por el otro, ya que ambos están en un proceso de evolución interrelacionada.

Existe una considerable distancia –social, económica, cultural, tecnológica, educativa y política– entre las personas a cargo de la planeación e instrumentación de proyectos que utilizan recursos naturales y las personas y grupos cuyas prácticas de uso del suelo son el tema del manejo. Frecuentemente, los decisores, administradores y muchos trabajadores sectoriales, pertenecen a una élite urbana más que a núcleos rurales y pobres, están orientados hacia el beneficio de tierras bajas más que al de tierras altas (o viceversa), y provienen de grupos étnicos distintos al que pertenecen los habitantes de la cuenca. En esos casos, los intentos por convencer a los habitantes de las tierras altas, cuyas actividades de sustento provocan efectos ambientales negativos aguas abajo, para cambiar y con ello beneficiar a los habitantes de las tierras bajas, están condenados a fallar a menos que se identifiquen condiciones sociales y de comportamiento, que se

aborden las inquietudes de distintos grupos sociopolíticos, que se reconozca la base cultural de diferentes patrones de uso del suelo, y que se eviten las tensiones creadas por una planeación vertical. La aceptabilidad de un programa descansa en satisfacer diferentes necesidades humanas en diferentes partes de la cuenca, aun si las condiciones físicas son las mismas.

#### *Coordinación: la dimensión institucional*

El sentido de propiedad y de responsabilidad comunitario en la utilización y conservación de los recursos naturales, es la quintaesencia de la estructura institucional para manejar una cuenca. Por ejemplo, si el valor de una tierra idónea para actividades forestales no puede ser capturado completamente por un grupo comunitario y por ese hecho deciden transformarla en un pastizal, los propietarios privados podrán obtener todo su valor reducido. Desde el punto de vista individual se ha obtenido un beneficio, pero desde la perspectiva global el *valor de oportunidad* de una tierra apropiada para actividades forestales ha sido degradado debido a su utilización inadecuada como pastizal.

Para concretarse, la acción colectiva requiere más que un consenso o una necesidad intensa; requiere condiciones para que las personas conciban la distribución de los recursos como un propósito común, no sólo desde sus intereses particulares, sino como una contribución personal para mejorar algo que deben sentir y saber que les pertenece. Por tanto, para acomodar las necesidades que se presentan en lugares específicos de una cuenca, el manejo tiene que comenzar tan cerca de la localidad o del campesino como lo permita la capacidad del organismo, y de ahí propagarse hacia niveles más altos de la organización institucional. En este contexto, el manejo –en contraste con la administración– significa que los usuarios y los funcionarios deben tomar decisiones conjuntamente para lograr metas y corregir desviaciones, y no esperar a que las condiciones decidan por ellos.

La coordinación institucional es una tarea primordial para ejecutar las funciones de manejo de una cuenca, ya que involucra interacciones entre unidades de organización responsables de diversas actividades. Estas organizaciones son más efectivas cuando tienen objetivos específicos, bien definidos y medibles, así como autoridad. Por tanto, el manejo y reglamentación de los usos del agua y del suelo debe desempeñarse en el nivel más bajo apropiado para cada necesidad. Sólo cuando un conflicto requiera concertación debe transferirse su manejo a un nivel jerárquico más alto; sin embargo, el control y la aplicación de la resolución debe permanecer en el nivel donde se originó la

disputa. El aparato institucional tiene que crear el ambiente necesario que permita regresar la resolución de problemas al nivel más bajo.

También debe considerarse un mecanismo para promover la integración intersectorial en cada nivel de las diversas jerarquías administrativas. Por ejemplo, funcionarios de todos los niveles deben motivarse y ser capaces de interactuar con funcionarios de otros sectores. Exonerar a las autoridades de funciones no esenciales y a la gente de la concepción errónea de que los funcionarios de alto nivel pueden resolver todos los problemas que se presentan en los niveles inferiores, habrá de resultar en una mejor administración. Los principales niveles de organización institucional son los siguientes:

- Un grupo de usuarios es un conjunto de personas con un solo propósito de utilización de los recursos de la cuenca, cuya identidad está proyectada a través del sentimiento de propiedad y responsabilidad. Mientras esos grupos de usuarios posean un interés común y no tengan conflictos mayores con otros grupos acerca del uso de los recursos, ese será frecuentemente el nivel más bajo apropiado para manejar la cuenca. Las principales funciones de un grupo de usuarios son la recolección de cuotas, recopilación de datos, vigilancia de reglamentos y la aplicación de sanciones.
- Una comunidad está formada típicamente por varios grupos de usuarios que representan diferentes intereses sectoriales, de tal manera que es el nivel más bajo en el que es posible lograr una integración intersectorial. Este nivel intermedio es generalmente responsable de la operación y mantenimiento de la infraestructura física, del racionamiento de los recursos cuando es necesario, de la emisión de permisos de descargas, de la aplicación de cuotas y tarifas y de la integración intersectorial.
- Una nación (o cuenca, para los casos donde una nación está ubicada completamente dentro de una cuenca) es la jerarquía más alta de la estructura institucional. Sus funciones principales son la resolución de conflictos entre intereses sectoriales, el establecimiento de acuerdos intergubernamentales, la asignación de fondos y el desarrollo de la capacidad institucional (*e.g.*, Alaerts, *et al.*, 1991, Garduño y Güitrón, 1992).

Considerando la escasez de recursos financieros y de mano de obra calificada, debe darse prioridad al fortalecimiento y a la adecuación de instituciones existentes. Si se requieren nuevas instituciones en diferentes niveles, conviene crearlas en armonía y coordina-

ción con la estructura sociopolítica en vigor, aun si su finalidad es promover la evolución del aparato administrativo hacia un nuevo orden. En cualquier caso, los cambios deben ser graduales para asegurar la continuidad en la entrega de servicios.

La creación de organizaciones con capacidad para aprender es una condición necesaria para administrar eficientemente los recursos naturales de una cuenca, ya que por lo general no existe experiencia presente en donde basar la administración. Aún más, los enfoques tradicionales de planeación presuponen que el conocimiento requerido para diseñar los programas proviene de especialistas, y que puede ser generado independientemente de la capacidad organizacional que lo instrumentará. Sin embargo, evaluaciones recientes de proyectos de administración de recursos naturales en cuencas que proveyeron beneficios a comunidades seleccionadas, han demostrado efectivamente la necesidad de un enfoque adaptivo que permita planear programas en coordinación con los beneficiarios y que pueda aprender cómo ser efectivo a partir de experiencias de programas de acción.

Los planes de desarrollo exitosos no son únicamente piezas de maestría mental, sino que deben constituir esfuerzos especiales que aseguren la cooperación entre las diversas organizaciones, especialmente en cuencas que atraviesan fronteras administrativas y políticas. La administración efectiva de los recursos naturales de una cuenca requiere compatibilidad entre aquellos con autoridad sobre el uso del suelo y aquellos que lo poseen y controlan su uso en la práctica.

#### *Participación: el paso de la instrumentación*

La consideración de aspectos físicos, tecnológicos, económicos, sociales, institucionales y políticos de un programa de manejo de una cuenca durante la etapa de planeación, determina las acciones, decisiones y políticas de manejo de la cuenca que deben realizarse, pero no dice nada acerca de cómo lograrlas, es decir, de las herramientas de instrumentación. No importa qué tan sólido pueda ser un plan de manejo de una cuenca, si los decisores presuponen que de algún modo se darán los ajustes adecuados en la fase de instrumentación real, es muy probable que el programa nunca logre su potencial completo.

Los administradores de los programas deben anticipar e incluso esperar que el plan y el diseño originales requerirán de modificaciones para ajustarse a las condiciones cambiantes e imprevistas que se presentarán durante su instrumentación. En este sentido, los usuarios son una fuente importante de información acerca de las prácticas que pueden ser física y socialmente

aceptables (Petersen, 1984); y no sólo eso, su participación desde el inicio del plan de manejo de la cuenca, implica un fuerte apoyo político y de organización continuos. Por tanto, la participación de los usuarios puede ayudar a los planeadores a desarrollar un conjunto aceptable de acciones de manejo de los recursos de la cuenca, y aumentar la probabilidad de que la instrumentación logre exitosamente los objetivos del programa.

Existen muchas herramientas de instrumentación aplicables al manejo de una cuenca, incluyendo:

- Arreglos legales como zonificación, reglamentaciones, controles, permisos, prohibiciones, licencias y concesiones.
- Incentivos monetarios como precios, tarifas, impuestos, subsidios, multas y subvenciones.
- Mejoramiento del conocimiento y de la información a través de asistencia técnica, programas de investigación, persuasión moral y educación.

Un plan de manejo de una cuenca puede incluir solamente una herramienta de instrumentación o recomendar una combinación de ellas. El plan de instrumentación tiene que diseñarse tan cuidadosamente como los aspectos técnicos y físicos del proyecto, y así conocer las actividades y tareas específicas requeridas para obtener los resultados planeados, antes de llevarlas a la práctica.

Para cada acción de manejo, deben considerarse varias herramientas de instrumentación y arreglos institucionales y evaluarlos con respecto a su factibilidad, costo y efectividad. Esta información puede conducir a propuestas para cambiar las organizaciones e instituciones (Dudley, 1992) o para modificar acciones específicas de manejo de los recursos que incrementen la efectividad del proyecto, reduzcan los costos de instrumentación y eviten las fallas debidas a conflictos entre agencias o a la carencia de apoyo político de personas clave.

Incluir el programa de instrumentación como un aspecto clave en los planes de manejo de una cuenca, tiene consecuencias obvias para el proceso de planeación. Una de las principales se relaciona con la claridad con la que se entiende la ponderación de los objetivos. Debido a que los proyectos de la cuenca involucran un cierto número de beneficiarios potenciales con diferentes objetivos, se tiene que buscar generalmente una situación conciliadora. Por ejemplo, ¿cuánto peso debe darse al objetivo de reducir la erosión del suelo y cuánto al de incrementar el nivel de ingreso en la región? Muchos programas de manejo de cuencas tienen estos dos objetivos que estarán en

conflicto, al menos en el corto plazo. No es fácil llegar a un acuerdo en su valoración, ya que los habitantes de la parte alta de la cuenca darán un peso mayor al ingreso que el proveniente del gobierno o de los pobladores aguas abajo.

La mayoría de los proyectos o programas pasan por un periodo de maduración, acorde a las condiciones encontradas en el área específica, durante el cual el manejo efectivo y el apoyo político son críticos para que una organización se ajuste a los cambios de condiciones socioeconómicas, inconsistencias entre los objetivos del programa y las debilidades en su diseño. Por ejemplo, un cambio en los precios de la ganadería o de la madera puede dificultar la introducción de prácticas para estabilizar el uso de los recursos en las cuencas altas. Los aumentos inesperados de población pueden provocar un ajuste en el plan para incluir una mayor producción de alimentos. Estos y otros cambios potenciales conducirán al ajuste del plan original. Por tanto, el programa debe ser flexible para ajustarse rápidamente a macrocambios inesperados y tener sistemas de monitoreo e información para sugerir cuándo y cómo deben llevarse a cabo los cambios.

### Planeación integrada de los recursos hidráulicos

El término *planeación integrada de los recursos hidráulicos* se ha popularizado recientemente (e.g., Copenhagen Informal Consultation, 1991, Hufschmidt y Kindler, 1991, Goodman y Edwards, 1992, Kulshreshtha, 1992, United Nations Department of Technical Co-operation for Development, 1992, United Nations, 1992, International Hydrological Programme, 1993, Dourojeanni, 1994) en respuesta a la creciente conciencia de la interrelación que existe entre las condiciones biofísicas, las innovaciones tecnológicas, el desarrollo económico, el desarrollo de la capacidad institucional, los procesos políticos y las actividades humanas. Sin embargo, el hecho de que el manejo de los recursos hidráulicos no es un fin en sí mismo y por tanto no puede estar aislado de los procesos socioeconómicos en general, fue reconocido tempranamente por Eckstein (1958), enfatizando que "la interdependencia entre diferentes proyectos fuerza al analista a emplear una *planeación global para el desarrollo de los recursos hidráulicos*".

El trabajo clásico de Maass, *et al.* (1962) considera a la cuenca hidrológica como un sistema e introduce la noción de responsabilidad unificada para coordinar la explotación de los recursos naturales en un valle, conduciendo a una *planeación integrada del agua*; aún más, se propone una planeación dinámica para responder a las condiciones cambiantes de la cuenca.

Este enfoque unificado fue explorado todavía más por Knesse y Bower (1968) con una *analogía de cuenca como empresa* que "selecciona la combinación de usos del agua que minimiza el costo total asociado con el nivel de actividad más rentable", es decir, los precios igualan a los costos marginales en niveles de rendimiento que satisfacen justamente la demanda. El Consejo de los Recursos del Agua de los Estados Unidos de América (*U.S. Water Resources Council*, 1969) recomendó utilizar un enfoque de *planeación multiobjetivo de los recursos hidráulicos*, enfoque también apoyado por Biswas (1976) y por Major (1977), considerando cuatro objetivos igualmente importantes:

- Desarrollo económico nacional.
- Calidad del ambiente.
- Bienestar social.
- Desarrollo regional.

La necesidad que tienen los sistemas hidráulicos de integrar aspectos cuantitativos y no cuantitativos tales como factores físicos, sociológicos, biológicos, económicos, políticos, legales, geológicos, agrícolas, etc., condujeron a Hall y Dracup (1970) a utilizar una *planeación regional de los recursos hidráulicos*. Buras (1972) sugirió utilizar una *planeación exhaustiva de los recursos hidráulicos* debido a que "la naturaleza interdisciplinaria de los recursos hidráulicos se mueve en el área donde las ciencias naturales y las ciencias sociales se traslapan".

Finalmente, la consideración de todas las dimensiones de los recursos hidráulicos animó a Haines (1977) para utilizar una *planeación integrada multiobjetivo de los recursos hidráulicos*, empleando modelación, optimización y administración jerárquica multiobjetivo.

Actualmente, el concepto de planeación por cuenca está bien establecido y el análisis de sistemas de recursos hidráulicos a través de una planeación con sitios, propósitos y objetivos múltiples está ampliamente diseminado (e.g., De Ridder y Erez, 1977, Lenton y Major, 1979, Kottegoda, 1980, Loucks, *et al.*, 1981, Fiering, 1982, Goodman, 1984, Helweg, 1985, Jermar, 1987, Esogbue, 1988, Major y Schwarz, 1990, Mays y Tang, 1992).

Aunque el agua juega un papel muy importante en el desarrollo de una región, su contribución se encuentra agregada en objetivos más amplios. Por ejemplo, el mejoramiento en el abastecimiento de agua potable y en la disposición de aguas residuales son componentes de esfuerzos más amplios para mejorar la salud, la vivienda y las condiciones globales de vida; los distritos de riego son sólo una parte de las actividades agrícolas que centran su atención en la producción de alimentos; la navegación está integrada en el sistema

global de transporte, y así sucesivamente. Esta integración elucida la necesidad fundamental de coordinar, desde un nivel institucional alto, el manejo del agua con programas relacionados para promover y garantizar una interacción intersectorial. Por tanto, interacción, integración y coordinación son las condiciones clave para lograr un plan exitoso de manejo integral del agua, el cual debe estar acorde con un desarrollo global autosostenido.

Se requieren grandes esfuerzos para mejorar la cooperación y la toma de decisiones intersectoriales que involucran estructuras formales e informales, que pueden ser políticas, institucionales y administrativas, para asegurar la consideración adecuada de factores que afectan la factibilidad del proyecto y la instrumentación y operación exitosas durante un largo periodo. La estructura organizativa que facilite esa planeación debe tomar en cuenta la multitud de sectores y organismos involucrados, si se desean evitar los conflictos entre esas entidades. Las jurisdicciones e intereses traslapados, e incluso las diferentes agendas políticas de las personas y organizaciones –que muchas veces tienden a estimular la lealtad hacia el ministro del sector, más que a apoyar las interacciones con funcionarios de otros sectores– tienen un efecto adverso en la planeación.

#### Optimización escalar

Es la clase más simple de optimización y se usa para obtener soluciones cuando se consideran proyectos aislados. Las soluciones no son, por supuesto, relevantes para la planeación integrada de los recursos hidráulicos, excepto por el hecho de que la optimización multinivel requiere soluciones de problemas con función objetivo escalar para coordinarse en un nivel jerárquico más alto, produciendo así soluciones óptimas globales.

En tales circunstancias, cada actividad relacionada con el agua tiene sus propias condiciones de operación, y por consiguiente, sus propios objetivos y restricciones. En el nivel más bajo de instrumentación apropiada, cada actividad tiene que ser optimizada y controlada de una manera descentralizada para obtener reglas de operación. Éstas pueden obtenerse a través de optimización clásica con una sola función objetivo, tal como

$$\text{Opt } f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

sujeto a

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b} \quad (2)$$

donde el operador  $\text{Opt}\{\bullet\}$  significa maximización o minimización,  $f(\bullet)$  es la función objetivo,  $\mathbf{x}$  es el vector de variables de decisión,  $\mathbf{g}(\bullet)$  es un conjunto de restricciones y  $\mathbf{b}$  es el vector de recursos disponibles para obtener el objetivo deseado.

La función objetivo es la fuerza propulsora en estos modelos, y cualquier solución óptima obtenida es claramente dependiente de las suposiciones incorporadas en la representación de la función objetivo, de las restricciones y de las relaciones entrada-salida. Todos los modelos matemáticos están basados en hipótesis y criterios que resultan en fuentes de incertidumbre interna. Algunas de esas fuentes pueden atribuirse a la selección de la topología, parámetros, cobertura y énfasis del modelo. Otras fuentes están relacionadas con los datos, las técnicas de optimización usadas para resolver los modelos matemáticos, la subjetividad humana y la incapacidad para considerar en el modelo muchos de los aspectos no cuantitativos e intangibles.

Entonces, el término *solución óptima* se refiere esencialmente a la mejor solución del modelo matemático bajo todas las hipótesis, ya sean explícitamente consideradas, implícitamente incorporadas, intencionalmente excluidas o inadvertidamente omitidas, y no necesariamente a la solución óptima del sistema real. Por tanto, la modelación matemática no debe ser un sustituto del proceso de toma de decisiones, sino más bien una herramienta coadyuvante.

Una vez identificadas y cuantificadas las limitaciones del modelo matemático considerado, éste puede utilizarse efectivamente como modelo de simulación para responder preguntas del tipo ¿qué sucedería si se hiciera tal cosa? Existen muchos textos excelentes para resolver este tipo de problemas (O'Laoghaire y Himmelblau, 1974, Taha, 1976, Bazaraa y Jarvis, 1977, Hillier y Lieberman, 1980, Gill, *et al.*, 1981, Singh, 1981, Bertsekas, 1982, 1987, por citar sólo algunos). La formulación específica para cada actividad relacionada con el agua tiene que abordarse, en la escala de tiempo adecuada, de acuerdo con las leyes físicas que gobiernan el problema.

#### Planeación con niveles múltiples

En el estudio de sistemas de gran escala con aspectos tecnológicos, sociales y ambientales, los esfuerzos en la planeación así como en la optimización son amplificados y frecuentemente abruma el análisis. Esto se debe a la elevada dimensión –gran cantidad de variables– y a la complejidad –no linealidad en el acoplamiento y en la interacción entre variables– de los modelos resultantes. En años recientes, el establecimien-

to de bases teóricas y el desarrollo de herramientas computacionales de descomposición y de planeación multinivel han sido exitosamente aplicados a problemas complejos de manejo del agua (Goreux y Manne, 1973, Singh y Titli, 1978, Paudyal y Gupta, 1990).

El concepto de enfoque multinivel está basado en la descomposición de sistemas complejos y de gran escala, y en la modelación posterior de los sistemas como subsistemas independientes. Este enfoque descentralizado utiliza los conceptos de estratos, capas y escalones, los que permiten analizar y comprender el comportamiento de los subsistemas en un nivel bajo, y transmitir la información obtenida a menos subsistemas de nivel más alto.

Cuando se requiere una mayor descentralización, el sistema se descompone aún más. Esta descomposición se logra introduciendo en el sistema nuevas variables, llamadas pseudovariables. Entonces cada subsistema se optimiza separada e independientemente, quizá con diferentes técnicas de optimización, con base en la naturaleza de los modelos del subsistema así como en los objetivos y restricciones de los mismos. De aquí se obtiene una solución de primer nivel. Los subsistemas se unen acoplando variables que se manipulan en un segundo nivel para llegar a la solución óptima de todo el sistema. A ésta se le llama solución de segundo nivel. Una manera de lograr la independencia entre subsistemas es relajar primero una o más de las condiciones necesarias para la optimización, y satisfacerlas en un segundo nivel.

La solución de problemas complejos de gran escala mediante optimización multinivel y descomposición, tiene varias ventajas significativas en comparación con métodos convencionales. Por ejemplo:

- Simplificación conceptual de sistemas complejos.
- Reducción en dimensionalidad.
- Programación y procedimientos computacionales más sencillos.
- Modelos del sistema más realistas.
- Interacción entre subsistemas.
- Aplicación a sistemas estáticos y dinámicos.
- Diferentes técnicas de optimización para cada subsistema.
- No es imprescindible desarrollar nuevos algoritmos.
- Interpretación económica de las variables.

Aún más, la planeación multinivel es aplicable en el análisis de sistemas con objetivos múltiples; en una estructura jerárquica, cada subsistema puede estar asociado con diferentes funciones objetivo. La coordinación global del sistema se convierte en un problema de optimización con objetivos múltiples.

### *Optimización jerárquica*

Los sistemas o estructuras jerárquicas son familias de subsistemas ordenados de manera jerárquica. Cada subsistema centra su interés en un aspecto específico del sistema global y ocupa un nivel determinado en la jerarquía. La operación de un subsistema en cualquier nivel de la jerarquía se encuentra directa y explícitamente influenciada por subsistemas en niveles más elevados. La influencia de los subsistemas de nivel alto restringe a los de nivel más bajo y refleja una prioridad en las acciones y objetivos de los subsistemas de más alto nivel. El cumplimiento de los objetivos de nivel más alto depende de las acciones y del desempeño de los subsistemas de nivel bajo.

Las estructuras jerárquicas de niveles múltiples que emergen al tratar con sistemas complejos y grandes, son de tres tipos:

- De estratos múltiples. Surge al abordar el dilema de describir –modelar– un sistema complejo y de gran dimensión. El conflicto aparece entre la simplicidad del modelo –un requisito necesario para entender– y por consiguiente en la estrategia de solución aplicada, y entre la habilidad para describir los numerosos aspectos de comportamiento del sistema. Los niveles de esta clase de jerarquía, que son descriptivos, se denominan estratos. Los estratos bajos involucran descripciones del sistema más detalladas y especializadas que los estratos altos. Cada estrato tiene sus propios conceptos y principios y puede tratar diferentes aspectos del sistema.
- De capas múltiples. Aparece al resolver situaciones de toma de decisiones complejas. Dos condiciones triviales pero importantes de casi todos los casos reales de toma de decisiones son: actuar sin demora y de ese modo evitar que las condiciones decidan por uno y tomar tiempo para entender mejor la situación. Las capas son, esencialmente, niveles de complejidad de la toma de decisiones. Los parámetros en los problemas de capas más bajas se fijan de acuerdo con las soluciones de problemas en capas más altas, y una solución del problema original se obtiene cuando los subproblemas en todos los niveles están resueltos. De esta manera una jerarquía de toma de decisiones compleja emerge naturalmente con referencia a tres fases esenciales de la toma de decisiones: determinación de objetivos y restricciones operacionales, recopilación de información y reducción de su incertidumbre, y selección de un curso preferido de acción.
- De escalones múltiples. Se presenta cuando un sistema complejo de gran dimensión se considera ex-

plícitamente formado de muchos subsistemas que interactúan entre sí. Los escalones tienen que ver con las relaciones mutuas entre los diversos subsistemas que comprenden el sistema. Cada subsistema busca obtener una meta, ya sea optimizando una función objetivo o satisfaciendo estándares deseados. Los conflictos entre subsistemas en un escalón se resuelven con subsistemas en escalones más altos. La coordinación, esto es, la resolución de conflictos, se logra mediante la intervención que se obtiene incluyendo ciertas variables en los objetivos de un subsistema que pueden ser manipuladas por subsistemas en escalones más altos (Findeisen, *et al.*, 1980). Las intervenciones pueden ser de los siguientes tipos: i) intervención por metas, la cual afecta factores relacionados con metas, ii) información, la cual afecta las expectativas del resultado, y iii) intervención en las restricciones, la cual afecta las acciones alternativas disponibles.

Las tres clases de jerarquía pueden emerger simultáneamente al tratar con un sistema complejo de grandes dimensiones. Las diferentes jerarquías sirven para diferentes propósitos y pueden estar anidadas una dentro de otra. La jerarquía de estratos múltiples se introduce con el propósito de modelar un sistema, la jerarquía de capas múltiples es para resolver las complejidades de la toma de decisiones y la jerarquía de escalones múltiples sirve con fines de organización. Algunos aspectos de los subsistemas de más alto nivel comunes a las tres clases de jerarquía, son que están relacionados con una porción mayor o con aspectos más amplios del sistema global, tienen horizontes de planeación más largos y poseen prioridad de acción sobre subsistemas de más bajo nivel. Detalles sobre control jerárquico dinámico se presentan en Singh (1980).

#### Formulación general de descomposición

Considérese una región que se ha descompuesto desde dos diferentes puntos de vista, de modo que las subregiones de una descomposición se superponen en la otra. Supóngase que una descomposición es desde el punto de vista hidrológico y que la otra es desde el punto de vista de obtención de metas. Cada subregión de la primera descomposición se ocupa de una actividad particular tal como irrigación, navegación, recreación, etc. El problema de optimización global para una región  $R$  dada puede representarse como (Haimes, 1977)

$$\text{Max}_x f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{x}; \alpha) \quad (3)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \alpha) \leq \mathbf{0} \quad (4)$$

sujeto a

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{u}, \mathbf{x}; \alpha) \quad (5)$$

donde  $\mathbf{y}$  es el vector de salidas regionales,  $\mathbf{u}$  es el vector de entradas regionales (no controlables),  $\mathbf{x}$  es el vector de variables de decisión,  $\alpha$  es el vector de parámetros del modelo y  $\mathbf{H}(\bullet)$  representa la transformación de entradas regionales y variables de decisión en salidas regionales.

Supóngase que la región  $R$  está descompuesta en  $N$  subregiones. Generalmente, la  $i$ -ésima subregión  $R_i$  tendrá una función objetivo  $f_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i, \sigma)$  y restricciones  $\mathbf{g}_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i, \sigma) \leq \mathbf{0}$ . El vector  $\sigma$  es un vector de coordinación de pseudovariables que posibilitan la descomposición. Los vectores  $\mathbf{u}_i$ ,  $\mathbf{x}_i$  y  $\alpha_i$  son subvectores de  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{x}$  y  $\alpha$ , respectivamente, y  $\mathbf{m}_i$  es el vector de entradas a la subregión  $R_i$  provenientes de otras subregiones. En general, las subregiones están acopladas a través de sus entradas y salidas

$$\mathbf{m}_i = \sum_{j=1}^N C_{ij} y_j, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

y

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

donde  $\mathbf{y}_i$  es un vector de salidas de la subregión  $R_i$  y  $C_{ij}$  son las matrices de acoplamiento. En general, el  $i$ -ésimo problema de optimización de una subregión tiene la forma

$$\text{Max}_{\mathbf{x}_i} f_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i, \sigma) \quad (8)$$

sujeto a

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i, \sigma) \leq \mathbf{0} \quad (9)$$

Los detalles del problema de optimización subregional dependen de los métodos específicos de descomposición y de coordinación utilizados. El problema regional global puede expresarse en variables subregionales separables como

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i) \quad (10)$$

sujeto a

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i) \leq \mathbf{0} \quad (11)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}(\mathbf{m}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i; \alpha_i) \quad (12)$$

$$\mathbf{m}_i = \sum_{j=1}^N C_{ij} \mathbf{y}_j \quad (13)$$

donde  $i = 1, \dots, N$ .

Bien puede ser que la aplicación más significativa de este enfoque es en el área de simulación y en la generación de soluciones y políticas alternativas. En una situación real de planeación, frecuentemente es preferible obtener varias soluciones cercanas al óptimo que una solución óptima única, ya que así los decisores tienen la oportunidad de ejercitar su juicio para elegir entre un conjunto de alternativas aceptables. Dado un conjunto de alternativas económicamente viables, el analista puede aplicar restricciones geográficas, ambientales, políticas o sociales al proceso final de decisión.

#### Formulación multiobjetivo general

Los sistemas reales, grandes y pequeños sin excepción, se caracterizan por tener objetivos y metas múltiples que frecuentemente están en conflicto o en competencia unos con otros. Esto es particularmente cierto en sistemas de aprovechamientos hidráulicos y ambientales, donde están involucradas muchas instituciones y usuarios con diferentes preferencias y responsabilidades. La planeación del uso del agua y del suelo en una cuenca debe responder a los objetivos múltiples inherentes, y debe considerar el peso específico entre esos objetivos. El Consejo de los Recursos del Agua de los Estados Unidos de América (*U.S. Water Resources Council 1973*) condensó los cuatro objetivos presentados en 1969 en dos igualmente importantes para proyectos federales de aprovechamientos hidráulicos:

- Desarrollo económico nacional. Realzar el desarrollo económico nacional incrementando el valor de bienes y servicios, y mejorando la eficiencia económica nacional.
- Calidad del ambiente. Realzar la calidad del ambiente mediante el manejo, conservación, preservación, creación, restauración o mejoramiento de la calidad de ciertos recursos naturales y culturales y sistemas ecológicos.

El concepto de óptimo de Pareto, también conocido como solución no inferior, es fundamental para el análisis de objetivos múltiples. Cualitativamente, una solución no inferior de un problema multiobjetivo es aquella donde cualquier mejora de una función objetivo puede lograrse sólo con el deterioro de otra. Para defi-

nir matemáticamente una solución no inferior, considérese el siguiente problema con función multiobjetivo, conocido también como problema de optimización vectorial

$$\text{Max}_{\mathbf{x} \in X} \{ f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x}) \} \quad (14)$$

donde

$$X = \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \} \quad (15)$$

es el conjunto de todas las soluciones factibles, y  $\mathbf{x}$  es un vector N-dimensional de variables de decisión.

Se dice que una decisión  $\mathbf{x}^*$  es una solución no inferior para el problema (14), si y sólo si no existe otro punto  $\mathbf{x}_0$  tal que  $f_j(\mathbf{x}_0) \geq f_j(\mathbf{x}^*)$ ,  $j = 1, \dots, p$ , con desigualdad estricta para al menos una  $j$ . Claramente, la solución del problema multiobjetivo planteado por (14) no es única, y algún tipo de juicio subjetivo por parte del decisor debe añadirse al análisis cuantitativo.

El problema se complica aún más por el hecho de que puede haber varios decisores involucrados en la selección de una solución aceptable y preferida. Las diversas metodologías disponibles para resolver el problema (14) difieren principalmente en dos maneras:

- Los procedimientos empleados para generar las soluciones no inferiores y
- Los tiempos, las maneras y los medios usados para interactuar con los decisores, así como el tipo de información disponible para los decisores tal como pesos relativos, normas, características de los sistemas, etcétera.

El modelo de optimización vectorial es una manera concisa de formular un problema con objetivos múltiples. En realidad, un vector se maximiza sólo si pueden hacerse comparaciones entre sus elementos, y por tanto, reducirlo a un problema escalar. La planeación multiobjetivo involucra tres pasos: cuantificación de objetivos, formulación de alternativas y selección de planes (Loucks, *et al.*, 1981). La cuantificación de un objetivo es la adopción de alguna escala cuantitativa –numérica– que provea un indicador que muestre el grado de logro de un objetivo. Por ejemplo, uno de los objetivos de un plan de manejo de una cuenca podría ser la protección o preservación de la vida silvestre. Para jerarquizar cómo los distintos planes logran ese objetivo, se requiere un criterio numérico, tal como el área o la población de especies silvestres preservadas. La cuantificación no requiere que todos los objetivos estén descritos en unidades comparables ni que se les asignen costos y beneficios monetarios.



La meta de plantear un problema con objetivos múltiples es la generación de un conjunto de planes tecnológicamente eficientes y aceptables. Dos enfoques comunes para determinar planes son:

- El método de los pesos.
- El método de las restricciones.

Ambos métodos requieren numerosas soluciones de un modelo con un solo objetivo para generar los puntos de la frontera de producción-posibilidad de la función objetivo. El método de los pesos involucra la asignación de un peso relativo a cada objetivo para convertir el objetivo vectorial (14) a uno escalar, que es la suma pesada de funciones objetivo individuales. El modelo de objetivos múltiples es

$$\text{Max } Z = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + w_p f_p(\mathbf{x}) \quad (16)$$

sujeto a

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (17)$$

donde los pesos no negativos  $w_1, w_2, \dots, w_p$  son constantes especificadas. Éstas se varían sistemáticamente y el modelo se resuelve para cada conjunto de valores, generando así un conjunto de planes técnicamente eficientes –no inferiores. El principal atributo del método de los pesos es que la ponderación o tasa marginal de sustitución de un objetivo por otro en cada punto identificado de la frontera de producción– posibilidad de la función objetivo, está explícitamente especificada por los pesos relativos. La tasa marginal de sustitución entre cualesquiera dos objetivos  $f_j$  y  $f_k$  es

$$-\left. \frac{df_j}{df_k} \right|_{f=\text{constante}} = \frac{w_k}{w_j} \quad (18)$$

cuando cada uno de los objetivos es continuamente diferenciable en el punto considerado. Estos pesos relativos pueden variarse dentro de rangos razonables para generar una gama amplia de planes que reflejen diferentes prioridades. La desventaja principal del método de los pesos es que no puede generar toda la frontera de eficiencia a menos que ésta sea estrictamente convexa. Si la frontera, o cualquier porción de ella, es cóncava, sólo los puntos finales de la región cóncava serán identificados.

El método de las restricciones para planeación multiobjetivo siempre puede producir el conjunto completo de planes eficientes. En su forma general, el modelo de restricciones es

$$\text{Max } f_i(\mathbf{x}) \quad (19)$$

sujeto a

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad \forall i \quad (20)$$

$$f_k(\mathbf{x}) \geq L_k, \quad \forall k \neq j \quad (21)$$

En este modelo, un objetivo  $f_k(\mathbf{x})$  se maximiza sujeto a límites inferiores  $L_k$  en los otros objetivos. Una solución correspondiente a cualquier conjunto de límites inferiores factibles  $L_k$ , produce una alternativa eficiente si la restricción de cada  $f_k(\mathbf{x})$ ,  $k \neq j$ , es activa. El modelo de las restricciones es particularmente atractivo cuando se puede resolver mediante programación lineal. En ese caso, la capacidad de análisis de sensibilidad de la mayoría de los paquetes de programación lineal para computadora, generará rápidamente soluciones alternativas para diferentes valores de los  $L_k$ 's. Obsérvese también que las variables duales asociadas con los valores  $L_k$  son las tasas marginales de sustitución o tasas de cambio de  $f_j(\mathbf{x})$  por unidad de cambio en  $L_k$  –o en  $f_k(\mathbf{x})$ , si la restricción asociada con el límite inferior es activa.

Claramente, el problema que enfrenta el analista es que los valores socialmente óptimos de los pesos  $w_k$  o de los límites inferiores  $L_k$  son desconocidos. Son incluso desconocidos para los decisores, hasta que tienen la oportunidad de examinar los detalles e impactos de cada plan. No es posible que los decisores sepan lo que quieren –o lo que deben desear– hasta que conozcan lo que pueden obtener. Los métodos de los pesos y de las restricciones son dos ejemplos entre muchas técnicas disponibles para generar soluciones eficientes o no inferiores. El uso aislado de técnicas de generación presupone que una vez identificadas todas las alternativas no inferiores, los decisores serán capaces de seleccionar la mejor alternativa.

Por definición, la fase de selección de alternativas en la planeación multiobjetivo involucra a los responsables de aprobar o desaprobado los distintos planes. Se han propuesto y utilizado varios esquemas iterativos e interactivos, los cuales requieren la participación de decisores así como de planificadores o analistas. Algunos de éstos son extensiones de los métodos de planeación multiobjetivo.

Cada método difiere en el tipo de información requerida por parte de los decisores; por tanto, el mejor método para una situación particular dependerá no sólo del método mismo sino también de los decisores, del proceso de toma de decisiones y de las responsabilidades aceptadas por el analista y por los decisores. Entre los numerosos métodos para jerarquizar soluciones no inferiores (Haimes, *et al.*, 1975, Keeney y Raiffa, 1976, Cohon, 1978) pueden mencionarse dominación,

satisfacción, lexicografía, análisis de indiferencia, funciones de utilidad con atributos múltiples, el método de obtención de metas, programación conciliatoria, programación de metas, el método de pasos, el método del sustituto de valores ponderados, el método Electre, el método Delphi y muchos más. Prácticamente no hay manera de que el paso de selección pueda ser un procedimiento normativo; no puede haber un conjunto de criterios o métodos estándar que resulte en la identificación del proyecto preferido. En el mejor de los casos, un procedimiento iterativo en el que el analista trabaje con los decisores, puede resultar en una articulación razonable de preferencias y en una eventual convergencia hacia un plan que sea políticamente, así como técnica, social, financiera e institucionalmente factible.

### Ejemplos

En todo el mundo se han aplicado muchos modelos de planeación y manejo integrado de los recursos hidráulicos, aunque no se hayan identificado necesariamente con ese nombre. Una revisión de trabajos seleccionados (Loucks, *et al.*, 1985) muestra que algunos estudios han sido muy exitosos, y otros no. La crítica razonada de Rogers y Fiering (1986) elucida las principales limitaciones encontradas en la aplicación de modelos a sistemas reales de aprovechamientos hidráulicos. No obstante, existen varias aplicaciones bien documentadas en la literatura que pueden tomarse como guía para trabajos futuros.

Uno de esos casos corresponde a los modelos de programación para la economía, energía y agricultura mexicanas a través de optimización con niveles múltiples (Goreux y Manne, 1973). El problema se analizó mediante un sistema de modelos de optimización considerando tres niveles de agregación diferentes.

En el nivel más alto de agregación hay un modelo multisectorial de la economía mexicana, que incluye 15 sectores y cinco habilidades para el trabajo. En el nivel intermedio, hay dos modelos de sector: uno para agricultura, que considera 33 cultivos de ciclo corto y veinte distritos de riego, y otro para energía, que toma en cuenta electricidad, petróleo y acero. En el nivel más bajo de agregación, hay un modelo para un distrito de riego, y otro para plantas de energía eléctrica y líneas de transmisión en ocho regiones.

El objetivo de este modelo fue analizar la toma de decisiones en tres niveles. En el nivel central, las decisiones se refieren a la tasa de ahorro interno y al nivel de préstamos externos. En el nivel sectorial, las decisiones están relacionadas con subsidios en el uso de fertilizantes y con la política de precios para combusti-

bles industriales. En el nivel regional, las decisiones se enfocan a proyectos de inversión específicos, tales como un plan de riego o una línea de transmisión para energía eléctrica. Los resultados de este estudio mostraron el valor implícito del agua dentro de un marco de planeación integrada.

Un segundo caso bien documentado es el análisis de la cuenca del río Maumee en los Estados Unidos de América, a través de una modelación y optimización jerárquica multiobjetivo (Haines, 1977, Sung, *et al.*, 1984). La meta perseguida en este estudio fue desarrollar planes para lograr los objetivos adoptados por el Consejo de Recursos del Agua de los Estados Unidos de América (*U.S. Water Resources Council*, 1973), agrupados en diez categorías principales:

- Uso del suelo.
- Erosión y sedimentación.
- Calidad del agua.
- Pesca y caza.
- Recreación exterior.
- Inundación y drenaje.
- Abastecimiento de agua.
- Manejo de la bahía de Maumee.
- Política del agua y del suelo.
- Aspectos legales, institucionales y legislativos.

En la primera etapa de modelación, se desarrollaron diez submodelos para minimizar el costo total de manejar el uso del suelo, minimizar la contaminación por sedimentos debida a la erosión agrícola, minimizar la carga de fósforo en tierras de cultivo, maximizar las actividades recreacionales de la cuenca basadas en el uso del suelo, reforzar la conservación de presas de caza, medida a través del incremento en el número de días de caza, maximizar la adquisición de tierras inundables, minimizar el capital y el costo de operación y mantenimiento asociados con la expansión de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la cuenca durante el horizonte de planeación, minimizar la carga de contaminación puntual de fósforo proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales, minimizar la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en la corriente, y minimizar el déficit de oxígeno disuelto en la corriente.

A medida que el estudio progresó y más información y datos estuvieron disponibles, se integraron gradualmente varios submodelos para formar dos modelos más grandes —un modelo de planeación de uso del suelo y un modelo del costo de expansión de la capacidad de plantas de tratamiento de aguas residuales— donde las ventajas y desventajas entre varios objetivos pudieran analizarse.

La necesidad de dos modelos multiobjetivo separados se hizo evidente porque el costo para lograr los objetivos del segundo modelo es tres órdenes de magnitud más grande que el costo para obtener los objetivos del primero. La etapa final es la integración de todos los submodelos desarrollados en un modelo de planeación integrada multiobjetivo.

Un ejemplo final es el que corresponde al río Colorado en Argentina, a través de programación y planeación multiobjetivo (Major y Lenton, 1979). El escurrimiento medio anual en este río no es suficiente para satisfacer todas las demandas de agua deseadas; por tanto, se requiere asignar el agua para conciliar los patrones de desarrollo y los conflictos históricos por el recurso.

El plan de desarrollo incluye ocho presas de almacenamiento, 13 plantas hidroeléctricas, 17 distritos de riego y cuatro transferencias de agua entre cuencas. El estudio se planteó para determinar cuáles proyectos construir, el tamaño de esos proyectos, cuándo construirlos y cómo operarlos.

La metodología incluyó tres modelos. Un modelo de selección, estático y determinista, basado en programación lineal mixta, para determinar los proyectos que deben construirse. El segundo modelo utiliza simulación para evaluar los resultados del primer modelo mediante gastos sintéticos generados para periodos de cincuenta años; esto permite aumentar o disminuir la capacidad de los almacenamientos, las extracciones blanco y la dimensión de los distritos de riego. El tercer modelo, basado en programación lineal mixta, se aboca al secuenciamiento de construcción de la infraestructura con el objetivo de maximizar el valor de nuevos beneficios económicos. Finalmente, el problema se enmarca dentro de un esquema de objetivos múltiples para maximizar los beneficios económicos netos y para minimizar la desviación total en la asignación equitativa de agua.

### **Lineamientos para un sistema de asignación de agua**

Históricamente, una preocupación central de la economía ha sido la asignación de recursos escasos para fines alternativos. En circunstancias ordinarias se considera que el mercado desempeña esta tarea de un modo razonablemente satisfactorio. Sin embargo, debido a las múltiples dimensiones involucradas en el uso y desarrollo de los recursos hidráulicos, no es posible esperar que el mercado por sí mismo pueda asignar el agua eficientemente o generar medios efectivos para su manejo. En consecuencia, la asignación de agua no es solamente una decisión económica, sino

que involucra aspectos políticos basados en factores sociales, tecnológicos e institucionales.

Como se ha argumentado, aunque los volúmenes de agua fueran suficientes para satisfacer sin conflicto todas las demandas de una cuenca en una época dada, el incremento de población ejercería presión sobre esos recursos crecientemente escasos. Entonces, no sólo es necesario construir más infraestructura hidráulica para aumentar la oferta de agua, sino lo es también manejar la demanda para garantizar la entrega continua de servicios y el nivel de bienestar social (United Nations, 1991).

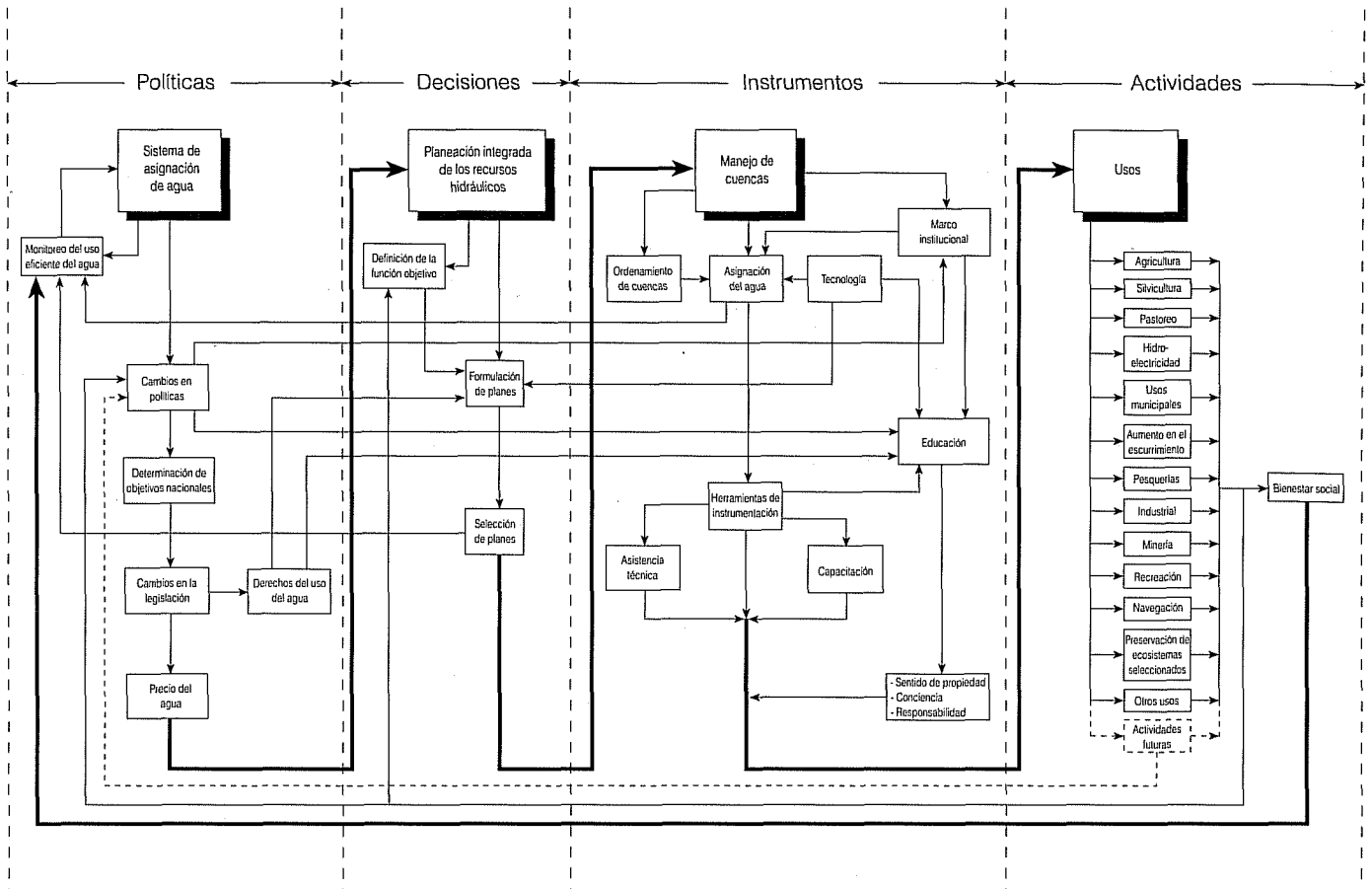
La asignación de agua en un tiempo dado depende de la tecnología disponible para lograr cada actividad relacionada con el agua dentro de una cuenca, conduciendo a un cierto nivel de eficiencia en el uso del agua. Por tanto, el uso eficiente del agua no es un estado al cual se deba llegar, sino más bien una actividad permanente y flexible para buscar el mayor bienestar posible en función de la asignación del agua.

El marco conceptual del uso eficiente del agua se presenta en la ilustración 1. Éste consta de actividades políticas inmersas en un sistema de asignación de agua, de un proceso de toma de decisiones incorporado en la planeación integrada de los recursos hidráulicos, de un conjunto de herramientas de instrumentación contenido en el manejo de cuencas y de una serie de actividades que reflejan los diversos usos que se le pueden dar al agua.

El sistema de asignación del agua monitorea constantemente la eficiencia en el uso de la misma. Si ésta, consecuencia directa del bienestar social es aceptable, no se promueve ningún cambio. De no ser así, hay varias opciones políticas, administrativas, económicas y técnicas. Si las condiciones socioeconómicas de un país han cambiado, se procede a modificar las políticas, leyes, reglamentos, códigos o normas hidráulicas nacionales. Cuando el aparato administrativo requiere fortalecimiento, se adecúa el marco institucional, sectorial e intersectorial, en el cual se da el manejo del agua.

En caso de que los incentivos para lograr el uso eficiente del agua no sean atractivos, se modifican los precios y las tarifas de cada uso, las posibles sanciones a cada usuario, y los volúmenes de asignación de agua en la cuenca para desanimar los usos ineficientes y animar los eficientes. Y, si la baja eficiencia en el uso del agua se debe a la falta de alguna actividad relacionada con su uso, se requiere incorporarla para superar las necesidades insatisfechas. Es decir, el esquema de la ilustración 1 no es un diagrama de flujo rígido que deba seguirse estricta y exhaustivamente en todos los casos. Por el contrario, es un marco con-

1. Marco conceptual del uso eficiente del agua



ceptual que indica los pasos a seguir para revisar un esquema de manejo de agua y, en caso necesario, ayuda a identificar las políticas, decisiones, instrumentos o usos del agua que se deben adecuar, suprimir o iniciar.

Obsérvese que el término asignación de agua aparece en varios niveles del proceso de uso eficiente del agua. La asignación de agua, como sistema, se aboca esencialmente al monitoreo constante de la eficiencia en el uso del agua y, cuando el caso lo amerita, a promover el diseño de políticas, la definición de objetivos nacionales y las adecuaciones en la legislación, a establecer mecanismos para otorgar derechos de uso del agua y a determinar las condiciones para fijar el precio de la misma.

En este nivel político, la asignación de agua se manifiesta en el conjunto de leyes y reglamentos, ya que es ahí donde se reflejan los objetivos nacionales empleados para diseñar políticas hidráulicas. Por ejemplo, si uno de los objetivos nacionales es darle prioridad al uso municipal del agua en relación con otros

usos, la asignación de ésta mostrará esa primacía al favorecer el otorgamiento de derechos de uso con ese fin y al establecer los precios y las tarifas que incentiven ese uso sobre otros.

En el nivel de planeación, la asignación de agua está implícita en la definición de la función objetivo y en la formulación y selección de planes. De hecho, los volúmenes de agua que se reservan en una cuenca para cada uso son variables de decisión cuyos valores se determinan a través de un proceso de toma de decisiones, generalmente mediante optimización o simulación. El resultado de estos modelos de investigación de operaciones provee una guía sobre el porcentaje de agua superficial, subterránea y pluvial en cada punto de una cuenca que deberá destinarse a un cierto uso en cada periodo del horizonte de planeación. Esto implica que en el nivel de planeación la asignación de agua no es un volumen específico sino un porcentaje de la disponibilidad de agua que se tenga cada año. Es decir, no se tiene la certeza de una asignación fija; si la disponibilidad resulta mayor en una

época, también lo será la asignación real durante la misma.

La asignación de agua, propiamente dicha, se lleva a cabo en el nivel de manejo de cuencas. Una vez decidido un plan hidráulico regional, la instrumentación de sus recomendaciones se hace año con año, o en periodos más cortos, en función de la disponibilidad real de agua, de los objetivos nacionales plasmados en el ordenamiento de la cuenca, de la tecnología con que se cuenta y de las prioridades y restricciones reflejadas en el marco institucional. En este nivel la asignación sí es un volumen de agua específico y, para lograr su uso eficiente, es necesario ofrecer incentivos económicos, asistencia técnica y capacitación a los usuarios.

El ideal de un programa exitoso de uso eficiente del agua es cuando los usuarios demuestran conciencia, responsabilidad y sentido de propiedad del agua y sus recursos naturales asociados; es decir, cuando pueden emplear productivamente el agua asignada y conservar su calidad sin necesidad de otorgárseles estímulos económicos ni aplicárseles sanciones.

Existe todavía otro nivel en el que un usuario puede asignar agua, en el sentido de distribución propia, para obtener un punto extra en la eficiencia del uso del agua. Dado el volumen asignado a un usuario, por ejemplo, un agricultor, éste puede decidir en qué cultivos y superficies empleará su dotación de agua. Este no es un problema trivial. Por una parte se tiene el propósito de maximizar las ganancias, lo cual no depende exclusivamente de la decisión del agricultor, sino también de las fuerzas del mercado, ya que si existe una oferta excesiva de un producto, su precio disminuye.

Por otra parte se tiene la vocación del suelo y el clima del lugar; una selección inapropiada de cultivos hará ineficiente el uso del agua y disminuirá los beneficios económicos. Otro aspecto que influye en la eficiencia del uso del agua es el número y espaciamiento de riegos. En este sentido, García-Villanueva y Aguilar-Chávez (1992) han demostrado que utilizando un criterio de déficit hídrico en la determinación de los cultivos y sus extensiones en una finca se pueden maximizar simultáneamente la eficiencia en el uso del agua, la calidad de los productos y los beneficios económicos.

## Conclusiones

El uso eficiente del agua en cuencas es un cuerpo interactivo de actividades, instrumentos, decisiones y políticas para lograr una asignación sostenible y económicamente eficiente de la cantidad y calidad del agua entre usos y usuarios competitivos, para obtener

del recurso el mayor bienestar social posible, preservando los derechos de generaciones futuras. El uso eficiente del agua no es un estado al cual se deba llegar, sino más bien una actividad permanente y flexible para lograr el mayor bienestar social posible en función de la asignación del agua.

Aunque los usuarios, en comparación con activistas, expertos y legisladores, son menos capaces o están menos dispuestos para identificar problemas importantes de política hidráulica, poseen la habilidad para identificar problemas importantes de apropiación y usos del agua. La conciencia de los usuarios de una cuenca y el sentido de responsabilidad conjunta para eludir las externalidades y los daños físicos derivados de las prácticas de uso de la tierra y del agua, deben estar enfocados a través de educación, ayuda técnica, entrenamiento e incentivos económicos, más que por regulación excesiva o la imposición de sanciones.

El manejo del agua puede ser un objetivo en sí mismo, cuando se consideran sólo los aspectos técnicos de cómo obtener ciertos resultados. Sin embargo, también se puede considerar como un componente de objetivos nacionales más amplios que interactúa con otras actividades sectoriales relacionadas con el agua, que deben coordinarse en un nivel institucional de mayor jerarquía. En este sentido, los estudios institucionales de manejo del agua están en su infancia comparados con la ingeniería e incluso con estudios económicos.

Aunque la voluntad política y las normas institucionales no producen por sí mismas eficiencia en el uso del agua pueden promoverla e incluso, mediante ciertos arreglos institucionales, canalizar fuerzas políticas de manera que conduzcan al uso eficiente del agua.

Por tanto, las instituciones y organizaciones no deben concebirse como exentas de evolución; se tienen que estimar los efectos de diferentes arreglos institucionales y organizativos y realizar planes para obtener los cambios deseados. De otra manera, las herramientas de instrumentación y las acciones de manejo de los recursos naturales tendrán que seleccionarse de modo que se ajusten al escenario institucional y organizacional disponible. En cualquier caso, para obtener un plan efectivo de manejo del agua, las organizaciones sociales tienen que ser la base de las acciones institucionales, que deben tender a fortalecer la acción colectiva y la internalización de externalidades. La definición de un plan de manejo del agua no será de ninguna utilidad si no existe una organización adecuada o una institución que lo instrumente.

Recibido: marzo, 1997

Aprobado: mayo, 1997

## Referencias

- Alaerts, G. J., T. L. Blair y F. J. A. Hartvelt (Eds.), 1991. *Una estrategia para la formación de capacidades en el sector de los recursos hídricos*, Delft, Países Bajos: Serie de informes del IHE número 24, Instituto Internacional de Infraestructura, Ingeniería Ambiental e Hidráulica. 217 pp.
- Ascher, W. 1978. *Forecasting: An appraisal for policy-makers and planners*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press. 239 pp. + xvi.
- Bamberger, M. y S. Cheema 1990. *Case studies of project sustainability*. Washington, D.C.: Economic Development Institute of the World Bank.
- Banco Mundial. 1994a. *La ordenación de los recursos hídricos*. Documento de política del Banco Mundial. Washington, D. C. 158 pp.
- Banco Mundial. 1994b. *El banco mundial y el medio ambiente. Ejercicio de 1993*. Washington, D. C. 220 pp. + xii.
- Baumann, D. D., J. J. Boland y J. H. Sims. 1984. Water conservation: The struggle over definition. *Water Resources Research*, 20(4):428-434.
- Bazaraa, M. S. y J. J. Jarvis. 1977. *Linear programming and network flows*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons. 565 pp. + x.
- Bertsekas, D. P. 1982 *Constrained optimization and Lagrange multiplier methods*. Nueva York, Nueva York: Academic Press. 395 pp. xiii.
- Bertsekas, D. P. 1987. *Dynamic programming: Deterministic and stochastic models*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Biswas, A. K. (Ed.). 1976. *Systems approach to water management*. Nueva York, Nueva York: McGraw-Hill, 429 pp. + xviii.
- Born, S. M. (Ed.). 1989. *Redefining national water policy: New roles and directions*. Publicación especial de la American Water Resources Association Núm. 89-1, 93 pp + v.
- Buras, N. 1972. *Scientific allocation of water resources*. Nueva York, Nueva York: American Elsevier Publishing Co., Inc. 208 pp. + x.
- Carter, V. G. y T. Dale. 1974. *Topsoil and civilization*. Norman, Oklahoma: University of Oklahoma Press (Edición Revisada), (Publicado por primera vez en 1955), 292 pp. + xvi.
- Cohon, J. L. 1978. *Multiobjective programming and planning*. Nueva York, Nueva York: Academic Press. 333 pp. + xiv.
- Copenhagen Informal Consultation. 1991. *Copenhagen report: Implementation mechanisms for integrated water resources development and management*. Nordic Freshwater Initiative for the United Nations Conference on Environment and Development (Rio, 1992) and the International Conference on Water and the Environment (Dublin, 1992), 60 pp. + iii.
- Cox, W. E. 1989. *Water and development: Managing the relationship*. Paris, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 50 pp. + vi.
- Dourojeanni, A. 1994. *Políticas públicas para el desarrollo sustentable: La gestión integrada de cuencas*. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Territorial y Ambiental. 239 pp. + viii.
- Dudley, N. J. 1992. An innovative institutional arrangement which incorporates the risk preferences of water users. En Haimes, Y. Y., D. A. Moser y E. Z. Stakhiv (Eds.), *Risk-based decision making in water resources V*, Nueva York, Nueva York: American Society of Civil Engineers. pp.174-199.
- Easter, K. W., J. A. Dixon y M. M. Hufschmidt (Eds.). 1986. *Watershed resources management: An integrated framework with studies from Asia and the Pacific*. Studies in Water Policy and Management No. 10. Boulder, Colorado: Westview Press, 236 pp. + xx.
- Eckstein, O. 1958. *Water resource development: The economics of project evaluation*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Enge, K. I. y S. Whiteford. 1989. *The keepers of water and earth: Mexican rural social organization and irrigation*. Austin, Texas: University of Texas Press. 222 pp. + xiii.
- Esogbue, A. O. (Ed.) 1988. *Dynamic programming for optimal water resources systems analysis*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall. 433 pp. + x.
- De Ridder, N. A. y A. Erez. 1977. *Optimum use of water resources*. Wageningen, Holanda: International Institute for Land Reclamation and Improvement. Publication 21. 250 pp. + xii.
- Fiering, M. B. (Presidente del Panel). 1982. *Scientific basis of water-resource management*. Washington, D.C.: National Academy Press. 127 pp. + xii.
- Findeisen, W., F. N. Bailey, M. Brdys, K. Malinowski, P. Tadjewski y A. Wóznik. 1980. *Control and coordination in hierarchical systems*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons.
- García-Villanueva, N. H. y A. Aguilar-Chávez. 1992. *Allocation policy rules based on hydric productivity*. International Commission on Irrigation and Drainage Third Pan-American Regional Conference, Mazatlán, Sinaloa, México, noviembre, 11 pp.
- Garduño, H. y A. Güitrón. 1992. *Desarrollo de la capacidad del sector agua*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Proyecto s/n, Progreso, Morelos, México. Junio. 37 pp. + iv.
- Gill, P. E., W. Murray y M. H. Wright. 1981. *Practical optimization*. Orlando, Florida: Academic Press, Inc. 401 pp. + xvi.
- Goodman, A. S. 1984. *Principles of water resources planning*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall. 563 pp. + xii.
- Goodman, A. S. y K. A. Edwards. 1992. Integrated water resources planning. *Natural Resources Forum*, Febrero pp. 65-70.
- Goreux, L. M. y A. S. Manne (Eds.). 1973. *Multi-level planning: Case studies in Mexico*. Amsterdam, Holanda: North-Holland Publishing Company. 556 pp. + viii.
- Haimes, Y. Y. 1977 *Hierarchical analyses of water resources systems: Modeling and optimization of large-scale systems*. Nueva York, Nueva York: McGraw-Hill. 478 pp. + xviii.
- Haimes, Y. Y. (Ed.). 1980. *Scientific, technological and institutional aspects of water resource policy*. Boulder, Colorado: Westview Press. 128 pp. + xiv.
- Haimes, Y. Y. (Ed.). 1981. *Risk/benefit analysis in water resources planning and management*. Nueva York, Nueva York: Plenum Press. 291 pp. + xii.

- Haimes, Y. Y., W. A. Hall y H. T. Freedman. 1975. *Multiobjective optimization in water resources systems: The surrogate worth trade-off method*. Amsterdam, Holanda: Elsevier.
- Haimes, Y. Y., P. Das y K. Sung. 1977. *Multiobjective analysis in the Maumee river basin: A case study on level-B planning*. Case Western Reserve University, Reporte Núm. SED-WRG-77-1, enero, 188 pp + xiii.
- Haith, D. A. 1982. *Environmental systems optimization*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons.
- Hall, W. A. y J. A. Dracup. 1970. *Water resources systems engineering*. Nueva York, Nueva York: McGraw-Hill. 372 pp. + xii.
- Helweg, O. J. 1985. *Water resources planning and management*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons. 364 pp. + xii.
- Hillier, F. S. y G. J. Lieberman. 1980. *Introduction to operations research*. San Francisco, California: Holden-Day, Inc. 829 pp. + xiv.
- Hufschmidt, M. M. y J. Kindler. 1991. *Approaches to integrated water resources management in humid tropical and arid and semiarid zones in developing countries*. International Hydrologic Programme-Phase III Project 10.1(a)/10.2(a)\1, París, Francia: UNESCO/UN. 134 pp. + x.
- International Hydrological Programme. 1991. *World water resources: Scientific and management priorities*. París, Francia: UNESCO. 28 pp.
- International Hydrological Programme. 1993. *Integrated water resource management*. París, Francia: UNESCO. 37 pp.
- James, L. D. y R. R. Lee. 1971. *Economics of water resources planning*. Nueva York, Nueva York: McGraw-Hill. 615 pp. + xx.
- Jermar, M. K. 1987. *Water resources and water management*. Amsterdam, Holanda: Elsevier.
- Keeney, R. L. y H. Raiffa. 1976. *Decisions with multiple objectives: Preference and value tradeoffs*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons. 569 pp. + xxx.
- Kleinspehn, K. L. y C. Paola (Eds.). 1988. *New perspectives in basin analysis*. Nueva York, Nueva York: Springer-Verlag.
- Knesse, A. V. y B. T. Bower. 1968. *Managing water quality: Economics, technology, institutions*. Washington, D.C.: Resources for the Future, Inc. 328 pp. + xiv.
- Kottogoda, N. T. 1980. *Stochastic water resources technology*. Nueva York, Nueva York: John Wiley & Sons. 384 pp. + x.
- Kulshreshtha, S., L. Somlyódy y Z. Kaczmarek. 1992. *Integrated water resources management: Some research needs*. International Conference on Water and the Environment: Developing Issues for the 21st Century, Dublín, Irlanda, enero, 10 pp.
- Le Moigne, G., A. Subramanian, M. Xie y S. Giltner. 1994. *A guide to the formulation of water resources strategy*. Washington, D. C.: World Bank Technical Paper Number 263. 102 pp. + xvii.
- Loucks, D. P., J. R. Stedinger y D. A. Haith, 1981. *Water resource systems planning and analysis*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall. 559 pp. + xvi.
- Loucks, D. P., J. R. Stedinger y U. Shamir. 1985. Modelling water resource systems: Issues and experiences. *Civil Engineering Systems*, Vol 2, diciembre: pp. 223-231.
- Maass, A. M. M. Hufschmidt, R. Dorfman, H. A. Thomas Jr., S. A. Marglin y G. M. Fair. 1962. *Design of water-resource systems: New techniques for relating economic objectives, engineering analysis, and governmental planning*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press. 620 pp. + xix.
- Major, D. C. 1977. *Multiobjective water resource planning*. Washington, D.C.: American Geophysical Union Water Resources Monograph 4. 81 pp. + viii.
- Major, D. C. y R. L. Lenton. 1979. *Applied water resource systems planning*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall. 248 pp. + viii.
- Major, D. C. y H. E. Schwarz. 1990. *Large-scale regional water resources planning*. Kluwer Academic Publisher.
- Mays, L. W. y W. H. Tang. 1992. *Hydrosystems engineering and management*. Nueva York, Nueva York: McGraw-Hill.
- Melville, R. y F. Peña (Compiladores). 1996. *Apropiación y usos del agua: Nuevas líneas de investigación*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo. 143 pp. + ii.
- O'Laoghaire, D. T. y D. M. Himmelblau. 1974. *Optimal expansion of a water resources system*. Nueva York, Nueva York: Academic Press, Inc.
- Paudyal, G. N. y A. D. Gupta. 1990. Irrigation planning by multilevel optimization. *ASCE J. of the Irrigation and Drainage Division*, 116(2):273-291.
- Petersen, M. S. 1984. *Water resource planning and development*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Pierce, J. C. y N. P. Lovrich, Jr. 1986. *Water resources, democracy and the technical information quandary*. Millwood, Nueva York: Associated Faculty Press, Inc. 216 pp. + xii.
- Reuss, M. (Ed.). 1993. *Water resources administration in the United States*. East Lansing, Michigan: Michigan State University Press. 314 pp. + xi.
- Rogers, P. P. y M. B. Fiering. 1986. Use of systems analysis in water management. *Water Resources Research*, 22(9): 146S-158S.
- Singh, M. G. 1980. *Dynamical hierarchical control*. Amsterdam, Holanda: North-Holland Publishing Company.
- Singh, M. G. 1981. *Decentralized control*. Amsterdam, Holanda: North-Holland Publishing Company.
- Singh, M. G. y A. Tittli (Eds.). 1978. *Systems: Decomposition, optimisation and control*. Oxford, Inglaterra: Pergamon Press.
- Sung, K., Y. Y. Haimes, L. T. Crook y D. Gregorka. 1984. Post evaluation of the planning process in the Maumee River basin level-B study. En Haimes, Y. Y. y D. J. Allee (eds.), *Multiobjective analysis in water resources*. Nueva York, Nueva York: American Society of Civil Engineers. pp. 97-119.
- Taha, H. A. 1976. *Operations research: An introduction*. Nueva York, Nueva York: Macmillan Publishing Co. 648 pp + xiv.
- United Nations. 1991. *Legislative and economic approaches to water demand management*. Nueva York, Nueva York. 65 pp. + v.
- United Nations. 1992. *Protection of the quality and supply of*

- freshwater resources: Application of integrated approaches to the development, management and use of water resources.* In-extenso Version of Chapter 18 Referring to Water of Project 21, Document A/CONF.151/4 (Parte II). Nueva York, Nueva York. pp. 174-216.
- United Nations Department of Technical Co-operation for Development. 1992. *Integrated water resources planning.* Dublín, Irlanda: International Conference on Water and the Environment. Enero. 125 pp. + iii.
- U. S. Water Resources Council. 1969. *Report to the water resources council by the special task force: Procedure for evaluation of water and related land resource projects.* Washington, D.C.
- U. S. Water Resources Council. 1979. *Principles and standards for planning water and related land resources.* Registro Federal, 38(174), Parte III, Washington, D.C., 1973. (Revisión: 44(242), Parte X).
- Wittfogel, K. A. 1957. *Oriental despotism: A comparative study of total power.* New Haven, Nueva Jersey: Yale University Press.

#### Abstract

Collado, J. "Water Use Efficiency in Watersheds" *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XIII. Nº 1, pages 27-49, January-April, 1998.

*The demand for water increases with the growth of population and socio-economic activities, and poses the problem of using it efficiently. This goes far beyond water conservation as it involves the agreement of water uses a society considers the most beneficial, and that process takes place in the political arena. It also implies the appropriate application of water in each use, the administration of the institutional body that manages it, the appropriation of better technologies for planning, assignment, and management, and the assimilation of a new water culture. In this paper it is proposed a definition of water use efficiency in watersheds, and the conditions under which it can be established are explored. Considered are some physical, chemical, biological, technological, economical, political, social, institutional, and operational aspects that impact watershed management, integrated water resources planning, and the implementation of a water assignment system. It is concluded that water use efficiency is not an state to which one should arrive but rather a continuing and flexible activity to track the enhancement in social well-being as a function of water assignment.*

**Key words:** Water planning; integrated water resources planning; water management; water use efficiency; water conservation; water assignment; water resources systems planning and analysis.

#### Dirección institucional de autores:

Jaime Collado .

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532  
Col. Progreso, Jiutepec, Mor., CP. 62550  
Tel. (73) 19 40 49  
E-mail: jcollado@tlaloc.imta.mx