

TEMA 3.1 RECURSOS HIDRICOS

CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores D. Rodríguez, R. Muñoz, J. Cornejo y C. Espinoza
Semestre Otoño 2004

1. INTRODUCCION

El manejo de recursos hídricos a una escala global ha evolucionado desde su objetivo original de suministrar agua a un costo mínimo, para promover el desarrollo, a un esquema contemporáneo en el cual existe una gran cantidad de objetivos, a veces conflictivos, que deben ser examinados. Los beneficios, desde control de crecidas a recreacionales, son evaluados en términos de las necesidades y actividades humanas. La aplicación de este concepto más amplio está basada en la comprensión de todos los factores que influyen en las decisiones. Estos y otros temas son cubiertos en esta sección del curso. Aquellos elementos necesarios para una planificación exitosa, incluyendo flexibilidad, así como métodos para medir beneficios (especialmente aquellos no económicos) son parte de este capítulo.

2. MANEJO DE LOS RECURSOS HIDRICOS

2.1 Importancia del Agua

Los recursos hídricos han sido críticos para la sociedad humana desde que las personas descubrieron que los alimentos podían ser producidos mediante el cultivo de vegetales. Eventualmente, el agua fue usada para mover máquinas que simplificaron las actividades humanas: molinos y procesos industriales. La abundancia del agua en la atmósfera la transformó en el solvente por excelencia, por lo cual ha sido usada para limpiar diversos residuos de contaminación humana. Hasta poco tiempo atrás el enfoque para obtener agua para cualquier uso era más o menos simple: ubicarse cerca de las fuentes de agua, o almacenar y transportar el agua para su uso específico. Después de su uso el agua era descargada al cuerpo de agua más cercano, lo que generalmente correspondía a la misma fuente de la cual provino.

El crecimiento exponencial de la población humana así como la expansión industrial obligó a incrementar la cantidad de agua suministrada y a complicar su distribución. Esta situación fue solucionada en parte mediante la construcción de represas, embalses, cambios del curso de ríos, tuberías de conducción y acueductos para traer el agua desde fuentes distantes y no contaminadas. Asimismo, la aplicación de tecnología moderna para suplir las necesidades de agua para usos municipales, agrícolas e industriales ha aumentado la competencia por las fuentes de agua de fácil acceso.

2.2 Necesidad de Control

El efecto directo que los diversos usuarios sobre los demás es la creación de un déficit de agua para ellos y para los otros usuarios. Los efectos menos directos (y menos obvios tal vez) son la contaminación de las aguas debido a descargas de aguas servidas y escorrentía superficial, los cambios en la vida acuática, y un aumento en la salinidad del curso de agua. Por ejemplo, la lixiviación de herbicidas, pesticidas, y fertilizantes desde tierras cultivadas puede alterar la

cadena alimenticia acuática de tal forma de afectar actividades como la pesca deportiva, o generar las condiciones para un crecimiento explosivo de algas, las que podrían afectar negativamente los suministros de agua para ciudades e industrias. La forma de solucionar estos conflictos pasa por un cambio en las prácticas tradicionales de uso de la tierra, lo que puede ser muy costoso y difícil de implementar. Este complejo sistema de interrelaciones entre usos y consumidores del agua caracteriza el tipo de situaciones que deben ser compatibilizadas con el propósito de controlar los recursos hídricos en una cuenca.

Las diversas opciones que son posibles en el desarrollo de recursos de agua pueden beneficiar distintos grupos en forma desigual. Grandes proyectos, tal como presas y embalses, ya sean para control de crecidas, generación hidroeléctrica, riego, o agua potable, pueden servir a muchos propósitos, no todos ellos compatibles. Debido a los altos costos de inversión y a los impactos ambientales en el largo plazo, estos proyectos requieren la presencia de agentes estatales, quienes deben velar por el bienestar social. De esta manera, muchas de las decisiones en este tipo de proyectos tienen una importante componente política. De igual forma, proyectos de gran envergadura requieren la participación de todos los agentes involucrados, y no puede dejar de lado al público en general.

2.3 Objetivos en el Manejo de Recursos Hídricos

Los recursos hídricos en la naturaleza difícilmente existen en la cantidad y oportunidad que se les necesita. Además de esto, la erosión, crecidas, y sequías afectan la disponibilidad y calidad del agua para los distintos usos. El manejo correcto de los recursos hídricos de una región podría permitir la atracción de inversiones turísticas e industriales que permitan obtener una serie de beneficios directos e indirectos. EL manejo de los recursos hídricos requiere no sólo el control del flujo del agua sino también la comprensión del rol de los distintos usuarios dentro de una cuenca específica. De esta manera, el objetivo general del manejo de los recursos hídricos es maximizar los beneficios obtenidos de la utilización y control de los recursos de agua. Proyectos específicos pueden tener múltiples objetivos, cuyas importancias relativas deben ser establecidas. Esta evaluación será condicionada por la cantidad de agua a ser suministrada o controlada, la necesidad de proteger o mejorar su calidad, y el costo de proveer los beneficios potenciales a los diversos usuarios.

La selección de las técnicas de manejo del recurso hídrico más apropiadas para una situación definida dependerá fundamentalmente de datos adecuados. Otro punto muy importante es la comprensión de las distintas agencias involucradas, sus áreas de jurisdicción, y las leyes que las regulan. Asimismo, consideraciones de tipo económico y político son tan importantes como las de origen técnico al momento de elegir una alternativa de manejo para los recursos hídricos de una región.

3. CONSIDERACIONES TECNOLÓGICAS

3.1 Propiedades del Agua

El agua es el componente químico más abundante dentro de la biósfera, y es talvez el más importante. Casi toda la vida en la tierra, incluyendo los seres humanos, usa agua como el medio básico para un correcto funcionamiento metabólico. La remoción y dilución de muchos residuos humanos y naturales es obtenida a través del uso de agua. De igual modo, el agua posee características físicas que tienen un impacto físico directo sobre la evolución de nuestro ambiente y de la vida que se ha desarrollado en ella.

Los organismos que se desarrollan en un ambiente acuático están protegidos de los cambios bruscos de temperatura por el hecho que se requiere una gran cantidad de calor para elevar la temperatura del agua. El agua es una de solo dos sustancias la otra es mercurio que es más densa como un líquido que como un sólido. Si lo inverso fuera cierto, los lagos y ríos tenderían a congelarse desde el fondo hacia la superficie lo que acabaría con la vida acuática.

3.2 Distribución espacial y temporal del agua

El estudio de la distribución espacial y temporal del agua en la naturaleza se enmarca en la disciplina denominada Hidrología. La distribución del agua en el planeta está determinada por el ciclo hidrológico, que corresponde a un proceso continuo. Uno de los componentes más importantes de este ciclo es la precipitación, que presenta gran variabilidad espacial y temporal. A pesar que generalmente nos referimos a ríos y lagos como fuentes de agua, ellos a su vez dependen de la precipitación en forma de lluvia y nieve para recuperarse sus recursos. De esta manera, la disponibilidad de agua y la precipitación sobre una zona específica están directamente relacionadas.

La variación temporal de la precipitación en un lugar determinado se da a distintas escalas de tiempo (interanual, estacional, mensual, diaria, horaria, etc) que tienen incidencia importante en la planificación del recurso y en el diseño de obras de ingeniería.

Valores de la precipitación anual son de poca utilidad en la estimación directa de las cantidades de agua disponibles para su uso. Si embargo, estas cifras son útiles para identificar zonas en las cuales sería factible el tener déficit de agua o en las cuales los recursos son más que suficientes para suplir los requerimientos.

3.3 Cantidad de Agua Disponible

El agua en todas sus formas constituye una cantidad fija igual a $1.36 \times 10^{18} \text{ m}^3$. Esta increíble cantidad hace muy difícil entender porqué existen zonas de baja disponibilidad de agua. Sin embargo, cuando sólo consideramos el agua que está realmente disponible para ser usada, esta cantidad se reduce considerablemente. Aproximadamente un 97.2% del suministro global de agua se encuentra en los océanos. El sobrante, 2.8%, es agua dulce, pero de esta cantidad el 75% se encuentra inmovilizada en los casquetes polares, suelo y formaciones rocosas, dejando de esta manera sólo un 25% disponible como agua superficial y subterránea. Desgraciadamente, sobre el 99.4% de esta agua no es aprovechable directamente, lo que nos deja con sólo un 0.6% (es decir un 0.004% de la cantidad original) para suplir nuestras necesidades de agua.

3.4 Usos del Agua

Es muy importante distinguir entre usos **consuntivos** y **no consuntivos** del agua. El uso consuntivo es aquel que no deja el agua disponible para otro uso debido a evaporación, contaminación extrema, o infiltración profunda. La única forma de recuperar este recurso es una vez que el ciclo hidrológico la devuelve en forma de precipitación. El uso no consuntivo deja el agua disponible para reuso inmediato (después de un tratamiento si es necesario). De acuerdo a esto, la agricultura, debido a la evaporación y la percolación del agua usada en los cultivos, es responsable por cerca del 90% del agua no disponible para reuso. El agua conducida una gran distancia mediante canales de regadío abiertos y luego aplicada sobre amplias áreas es muy susceptible a pérdidas por evaporación e infiltración antes de alcanzar las raíces de los cultivos. El agua que percola a través de suelos irrigados puede ser reusada sólo un número reducido de

veces debido al aumento de los sólidos disueltos que acarrea en su paso a través del suelo. Otro ejemplo de uso consuntivo lo constituye el agua potable, cuyas aguas residuales resultan tan contaminadas (aguas servidas) que no puede considerarse su reuso sin un importante tratamiento. Usos no consuntivos del agua son, por ejemplo, la generación hidroeléctrica y algunos usos industriales.

3.5 Opciones para Suplir Demandas de Agua

La creciente demanda por agua ha causado que muchos países examinen formas en las cuales el agua esencial para el desarrollo actual sea garantizada pero se preserve además para usos futuros. Tres enfoques distintos han sido usados para cumplir esta meta. El primero de ellos consiste en aumentar la oferta mediante la realización de grandes proyectos de ingeniería para obtener más recursos desde el sistema de agua fresca antes de que ellos lleguen al mar. El segundo enfoque está basado en un aumento del reciclaje del agua, usando sistemas de purificación natural y contruidos por el hombre. Este enfoque, reuso, recircula el agua como un subciclo del ciclo hidrológico global. Finalmente, es posible actuar sobre la demanda, tomando medidas que involucren una disminución de ésta.

Algunas de las opciones de oferta para suplir la demanda de agua se indican a continuación:

- Presas y embalses son el medio más antiguo para controlar el flujo de agua. Sus beneficios son la ecualización y control del flujo de agua, la generación de energía hidroeléctrica, control de crecidas y sequías, y recreación. Algunos problemas de esta solución son las pérdidas por evaporación e infiltración, así como los cambios sedimentológicos en los ríos aguas abajo de estas obras.
- Traspase de aguas desde una cuenca hidrográfica a otra. Los beneficios de estos proyectos desde un punto de vista de abastecimiento son obvios. Sin embargo, los grandes costos involucrados y las pérdidas por evaporación son dos desventajas con respecto a otras alternativas.
- Uso de recursos subterráneos que son en general de mejor calidad que los superficiales disponibles en la misma cuenca. La extracción de agua desde un acuífero está limitada por la tasa a la cual se produce su recarga o de otra manera el nivel freático disminuirá en forma apreciable, aumentando los costos derivados de la explotación de los sistemas de bombeo. La recarga de acuíferos superficiales pueden ser hecha en forma muy simple y rápida, mientras que acuíferos profundos pueden tardar cientos de años en recuperar sus niveles originales. De esta forma, en este último caso se considera un recurso no renovable.
- La desalinización está tomando más atención a medida que países áridos reportan algún grado de éxito en su aplicación. La ósmosis inversa, en la cual se fuerza agua a través de una membrana semipermeable que deja pasar el agua pero atrapa las sales disueltas, es uno de los métodos más prácticos de aplicar con el fin de desalinizar aguas de origen salobre. En la actualidad las unidades de ósmosis inversa son caras y requieren una gran cantidad de energía para su operación pero se espera que estos costos disminuyan a medida que su utilización es más común.
- El uso de icebergs como suministro de agua para localidades costeras ha recibido alguna atención. Existen algunos problemas ambientales no resueltos que no hacen aconsejables su uso en la actualidad.

- Reubicación de la población humana desde zonas con escasez de recursos hídricos, es otra idea que se maneja en la actualidad para resolver algunos problemas puntuales relacionados con el suministro de agua.

En cuanto a opciones de reuso tenemos las siguientes:

- Un mejor tratamiento para permitir más reusos de agua que han sido contaminadas será un elemento vital de las futuras políticas de reuso del agua. Cuando no exista la posibilidad de nuevas fuentes de agua, el reuso de las actuales aguas de desecho será primordial para satisfacer los requerimientos futuros.
- Reducción de la evaporación desde superficies de agua tiene un gran potencial debido a la existencia de muchos embalses y lagos.
- Técnicas de conservación de agua es otra opción para hacer frente a los problemas derivados de la escasez del recurso.

En relación con la disminución de la demanda, ésta puede lograrse mediante:

- Avances tecnológicos (aumento de la eficiencia).
- Planificación y control de ubicación de asentamientos humanos y actividades productivas
- Un sistema de tarificación que incida a nivel de las decisiones de los usuarios.

3.6 Cuantificación de Efectos Ecológicos y Sociales

El agua une sistemas físicos, tales como la atmósfera, suelo y rocas, con sistemas vivos. Es un importante factor en la sociedad humana y afecta la forma en que las personas se relacionan unas con otras a través de una compleja red de leyes, derechos, servicios y actividades. El uso de limitadas cantidades de agua por un grupo de personas dentro de la sociedad afecta a otras personas así como a otros organismos vivos. Las relaciones entre distintos agentes en un sistema real son a veces muy fáciles de visualizar. Por ejemplo, la captura de peces por los pescadores artesanales en una caleta va a depender en forma importante del nivel de tratamiento de las aguas residuales provenientes de industrias localizadas en el sector. En algunos otros casos estas relaciones no son tan simples. Por ejemplo, la operación de un embalse con propósitos hidroeléctricos puede causar impactos sobre el medio ambiente no considerados al momento del proyecto.

4. GESTION DE RECURSOS HIDRICOS

Considerando que el agua es un recurso básico del medio ambiente, la gestión de los recursos hídricos debe necesariamente estar integrada a la gestión ambiental, dándole por lo tanto un carácter global y utilizando muchos de los elementos y conceptos que se aplican en ella. Esta gestión requiere de la intervención regulatoria del Estado.

El objetivo general de la gestión de los recursos hídricos es maximizar el beneficio social obtenido de la utilización y control de dicho recurso, considerando tanto la cantidad como la calidad del recurso.

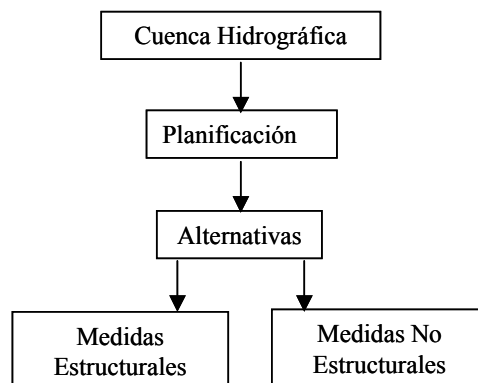
Para cumplir con ese objetivo es necesario identificar el rol de los distintos usuarios dentro de cada cuenca específica. En términos técnicos, en la mayoría de los casos, esto implica la necesidad de distribuir el recurso entre los diferentes usos y preservar su calidad, es decir, efectuar un manejo integral.

El instrumento utilizado para cumplir ese objetivo es la planificación, que corresponde al proceso que antecede a la implementación de un proyecto, donde son establecidos y analizados críticamente los objetivos del mismo. De igual modo, en este proceso son evaluados los medios para implementar el plan y los posibles resultados de su implementación. En la Figura 1 se muestra el esquema del proceso de planificación en el que interactúan las alternativas con los proyectos específicos. Un aspecto importante es que las alternativas analizadas pueden incluir tanto **medidas estructurales** (que implican la construcción de obras) como **no estructurales** (estrategias).

La planificación no es el diseño e implementación de un proyecto preconcebido, ni tampoco implica el control estatal de la actividades humanas. En términos muy generales la planificación analiza un conjunto de alternativas para un problema específico y entrega el análisis de todas ellas para que una autoridad responsable tome las decisiones correspondientes. De esta manera, la planificación puede ser entendida como el análisis de posibles soluciones considerando factores económicos, políticos, sociales legales y técnicos.

La planificación es un proceso dinámico previo al diseño e implementación de un proyecto específico, requiriendo por lo tanto de ajustes o modificaciones a lo largo del tiempo.

Figura 1
Esquema del Proceso de Planificación



4.1 Etapas en el Proceso de Planificación

A pesar de que cada situación de planificación es única dependiendo del proyecto, la región, quienes toman las decisiones, así como los medios y consecuencias de llevarlas a cabo existen algunos elementos comunes que pueden ser fácilmente identificados. De acuerdo a esto, el proceso de planificación es dividido en tres grandes etapas: formulación, evaluación, y adopción.

4.1.1 Formulación del Estudio

En primer lugar, la necesidad de la planificación debe ser entendida por los diversos agentes

involucrados en le problema.

El segundo paso, definición del grupo de planificación, es importante debido a que una serie de supuestos acerca del proyecto son realizados al momento de definir el grupo de expertos que producirán el informe de este estudio.

El conjunto de objetivos para este estudio debe ser claramente comprendido por todos los agentes involucrados de tal manera que la energía se concentre en la concreción de ellos. En este sentido es importante el tomar en consideración la posible duplicación de objetivos con otros estudios en desarrollo o desarrollados en el pasado.

Finalmente, esta etapa debe incluir la definición clara del alcance del proyecto y debe indicar qué se espera de cada integrante del equipo de trabajo. Este paso es clave en el éxito del estudio ya que debe incorporar la opinión y sugerencias de todos los organismos que puedan tener competencia en la solución del problema en análisis.

4.1.2 Evaluación de Alternativas

La evaluación de alternativas cubre cuatro etapas que incluyen desde la definición de cronogramas y duración del proyecto, hasta el análisis de beneficio costo para las diversas alternativas del proyecto. La primera de estas es importante porque permitirá fijar la duración aproximada del proyecto y de las diversas unidades que lo componen. En este sentido es importante mencionar que muchas veces esta etapa es crítica ya que una consideración errada de la duración y del cronograma de actividades del proyecto puede convertirlo en inviable.

La segunda etapa incluye el análisis y la recolección de información para el estudio así como la definición de nuevas campañas de muestreo con el fin de complementar y mejorar la información disponible. Una vez que la información disponible ha sido analizada es posible establecer un conjunto de alternativas que permitan cumplir los objetivos planteados para el proyecto. Finalmente, un análisis de beneficio costo permitirá establecer un criterio objetivo para una selección posterior de la o las mejores alternativas. Las actuales técnicas de análisis permiten incluir beneficios intangibles (no económicos) mediante técnicas computacionales que incluyen la interacción entre diversos agentes.

4.1.3 Adopción de un Plan

El progreso requerirá que diversas opiniones sean reconciliadas antes de encontrar una solución aceptable por todas las partes. La selección del mejor plan y su eventual adopción incluye una decisión política en la cual muchos factores (condiciones económicas, nivel de desempleo, otras prioridades) deben ser considerados. El planificador no es el que elige la mejor solución sino que las presenta para que una instancia política tome la decisión. Sin embargo, un estudio de este tipo debiera incluir un análisis acerca de las posibles consecuencias de aceptar una u otra de las alternativas presentadas.

En este sentido, el proceso de planificación puede incluir una serie de iteraciones. Generalmente, el conjunto de soluciones presentadas al tomador de decisiones se obtiene luego de un par de iteraciones.

Finalmente, cabe señalar que el proceso de planificación no termina con la adopción definitiva de una alternativa. En efecto, la alternativa seleccionada será analizada mediante estudios pilotos lo que puede llevar a una reanálisis de esa alternativa o de otras que se considere adecuadas para cumplir con los objetivos del estudio.

4.2 Gestión de Recursos Hídricos en Chile

En Chile la gestión de los recursos hídricos está radicada en diferentes ministerios que a través de algunas de sus reparticiones establecen control o regulación sobre la cantidad o calidad del agua por medio de diferentes cuerpos legales. Las aguas se dividen en continentales (ríos y lagos, napa subterránea) y jurisdiccionales (litoral costero).

A continuación se incluye un breve resumen con algunos organismos y cuerpos legales a través de los cuales el Estado realiza la gestión del agua.

- Ministerio de Obras Públicas

Organismos:

- Dirección General de Aguas
- Dirección de Obras Hidráulicas

Código de Aguas: vigente desde 1981, actualmente en revisión. Asignación de derechos de uso.

- Superintendencia de Servicios Sanitarios

Regulación de servicios de abastecimiento de agua potable y recolección y tratamiento de aguas residuales.

Norma de descarga de aguas residuales a redes de alcantarillado y cuerpos de agua. Para entrar en vigencia en 1999.

- Ministerio de Salud

Organismo: Servicio de Salud del Ambiente

Normas de calidad del agua para consumo humano y recreación (protección de la salud humana).

- Ministerio Secretaría General de la Presidencia

Organismo: Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)

Aspectos ecológicos del agua

Planes de promulgación de normas de descontaminación

- Ministerio de Defensa

Organismo: Dirección del Litoral y de Marina Mercante

Aguas jurisdiccionales. Utilización de zona costera y calidad de aguas marinas.

5. CALIDAD DEL AGUA

Las fuentes de agua disponibles para diferentes usos contienen, en la mayoría de los casos,

una serie de sustancias o compuestos químicos y microorganismos, cuyas características son muy variables y dan al agua propiedades que pueden definirla como apta o no para alguno de los posibles usos.

Para determinar si la calidad del agua es compatible con el uso previsto, es necesario definir sus características en términos principalmente cuantitativos, a través de **parámetros de calidad**, para compararlos con un estándar de calidad previamente definido para ese uso.

Los parámetros de calidad son características específicas del agua que permiten evaluar su aptitud para algún uso y que se definen de diferentes modos, por ejemplo:

- Concentración de constituyentes específicos (ej. metales).
- Uso de parámetros indicadores (ej. coliformes).
- Descripciones cualitativas (ej. libre de)
- Descripción en términos de efectos (ej. bioensayos)
- Escalas arbitrarias de parámetros (ej. turbiedad, color, pH)

En general. Los parámetros se pueden clasificar según el tipo de características del agua que afectan, en:

- Físicos (color, olor, sabor, temperatura, turbiedad).
- Químicos (metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos, indicadores específicos: dureza, pH, etc)
- Microbiológicos (bacterias, virus, algas, protozoos, etc)

Los valores máximos, mínimos o rangos de valores para cada uno de los parámetros (en relación con el uso) están basados en investigaciones y experiencias que determinan efectos producidos (Ej. Water Quality Criteria, USEPA). Esos resultados sirven de guía para la definición de los estándares o normas de calidad del agua para algunos usos. Una norma establece con obligatoriedad los requisitos de calidad que se deben cumplir. Los criterios considerados para la definición de normas dependen del uso específico que se dará al agua. Así, para agua potable priman criterios relacionados con el efecto de algunas sustancias en la salud humana, mientras que para el uso en riego, se incluyen además los posibles efectos sobre los cultivos y sobre la calidad del suelo.

La cuantificación de los parámetros debe realizarse con métodos de medición estandarizados de modo que los resultados sean reproducibles y comparables (ej, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, US).

En Chile, tienen aplicación las siguientes normas técnicas:

NCh 409 Of. 84	Agua Potable. Requisitos
NCh 1333	Requisitos de calidad de agua para distintos usos
	Riego
	Recreación con contacto directo
	Destinada a vida acuática

Además de las normas oficiales hay muchos requerimientos específicos para el agua industrial que si bien no están normalizados son necesarios para la eficiencia de los procesos productivos o protección de las equipos (ej. remoción de dureza en lavandería o para agua de calderas).

Para adecuar la calidad del agua de una fuente al requerimiento de calidad de un uso específico muchas veces se necesita el tratamiento de ella con el fin de reducir, remover o adecuar aquellos parámetros que no se ajustan a las exigencias.