



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Maestría en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

Gestión del agua en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, aplicando el modelo de simulación AquaTool

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
 Maestro en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

**Presenta:**  
 Doris Sophia Olivares Cadena

**Dirigido por:**  
 Dr. Eduardo Álvarez Mendiola

**SINODALES**

Dr. Eduardo Álvarez Mendiola

Presidente

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
 Secretario

M.I. Filiberto Luna Zúñiga  
 Vocal

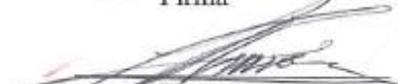
Dr. Carlos Fuentes Ruiz  
 Suplente

M.C. César Granada Izasa  
 Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
 Director de la Facultad

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
 Director de Investigación y  
 Posgrado

Centro Universitario  
 Querétaro, Qro.  
 Junio del 2013  
 México

## **Resumen**

En el presente trabajo se analiza la gestión del agua del Distrito de Riego 023, San Juan del Río, debido a la importancia que representa su escasez en el sector agrícola. Con la información de las características de las presas principales San Ildefonso y Constitución de 1917 y los 2 Módulos que conforman el Distrito de Riego, los aforos en los canales principales, las demandas agrícolas y la información hidrológica se realizaron las simulaciones para determinar la gestión del sistema. Se realizaron distintos escenarios para la serie de tiempo 2005-2012 debido a que las demandas van cambiando año con año y por cada ciclo agrícola, y dependiendo del déficit en los resultados se propuso una reducción porcentual en las demandas mensuales con el fin de disminuir el déficit en cada uno de los 2 Módulos principales que conforman el Distrito de Riego 023, San Juan del Río. En los resultados de la simulación se pudo observar que el déficit hídrico fue constante para el Módulo I, no así para el II. Además, mediante las propuestas de reducción de 10% de la demanda mensual para el Módulo II se obtuvo la eliminación de déficit excepto en 2009-2010. Con reducción del 25% y 50 % en las demandas mensuales se obtiene mejora en la gestión del recurso en un 60% de la serie de tiempo analizada.

## **Summary**

In this paper it analyzes the water management in Irrigation District 023, San Juan del Río, due to the importance that represents its scarcity in the agricultural sector. With the information of the characteristics of the dams San Ildefonso and Constitucion of 1917, the capacity main channels, agricultural demands and hydrological data were performed simulations to determine the system management. Different scenarios were performed to the time series 2005-2012, due that demands are changing every year. Depending of the deficit in the results set a percentage reduction in monthly demands in order to decrease the deficit in the modules that comprise the system. In the simulation results it was observed that the water deficit was constant for Module I, not for the II. Moreover, through the proposed 10% reduction in monthly demand for Module II was obtained the eliminating deficit except in 2009-2010. With reduction of 25% and 50% in monthly demands is obtained improved resource management in 60% of the analyzed time series.

## **Dedicatoria**

A mis padres, que son la mayor razón por la cual realicé estos estudios de posgrado, porque todo el esfuerzo que han invertido en mi formación académica nunca será mayor que el agradecimiento que siento por su apoyo brindado incondicionalmente.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos, por todo el apoyo brindado a lo largo del curso de la maestría, siendo un apoyo importante académicamente, por transmitirme mucho de su conocimiento y sobre todo por no truncar mis ideas e iniciativas de trabajo alentándome a terminar mis estudios. Al Maestro César Granada Izasa, por su apoyo y consejos para realizar la tesis. Al Dr. Eladio Delgadillo Ruíz, por el apoyo a lo largo de la maestría e impulsarme a concluirla, a mis compañeros de la maestría de Recursos Hídricos y Ambiental y a todas aquellas personas que de una u otra manera formaron parte de mi formación.

## ÍNDICE

Resumen.....	I
Summary.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Índice.....	V
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	VIII
1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Descripción del problema.....	5
1.2.1 Distrito de Riego 023, San Juan del Río.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivo particular.....	7
2. Antecedentes.....	8
2.1. Los sistemas de recursos hídricos.....	9
2.2 Los Modelos hidroeconómicos.....	9
3. Gestión de un sistema de recursos hídricos mediante un modelo de simulación.....	13
3.1. La gestión y planificación.....	13
3.2. Objetivos de la gestión de un sistema de recursos hídricos.....	16
3.3. Fundamentación de la Gestión del sistema de recursos hídricos.....	18
3.4. La Simulación.....	23
4. Economía de los recursos hídricos.....	26
4.1 Definición y conceptos de economía del agua.....	27
4.2 El valor económico y los costos de los servicios del agua.....	30
5. Aspectos generales de la zona de estudio.....	34
5.1 Caracterización de la zona de estudio DR023 San Juan del Río.....	34
5.1.1 Hidrología.....	34

5.1.2	Clima.....	37
5.1.3	Vegetación .....	37
5.1.4	Suelo y usos.....	37
5.1.4	Obras hidráulicas.....	38
6.	Descripción de la metodología.....	45
6.1	Análisis de la información.....	45
6.2	Unidades de demanda agrícola.....	48
6.3	Demandas consuntivas.....	49
6.4	Elaboración del esquema.....	49
6.5	Escenarios de análisis.....	53
7.	Resultados y conclusiones.....	54
7.1	Resultados de las simulaciones.....	54
7.2	Escenarios analizados.....	55
7.3	Conclusiones.....	63
	Literatura citada.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
1.1	Distribución de los volúmenes consuntivos, 2010 (Fuente: SAGARPA).	2
4.1	Curvas de oferta y demanda	29
4.2	Valor de los servicios del agua (Fuente: adaptado de Rogers, <i>et al</i> , 1998)	33
5.1	Localización de la zona de estudio: Distrito de Riego 023, San Juan del Río	34
5.2	Hidrografía más importante del Distrito de Riego 023	35
5.3	Regiones hidrológicas del Distrito de Riego 023	36
5.4	Uso de suelo y vegetación del Distrito de Riego 023	38
5.5	Distrito de Riego 023, San Juan del Río	41
5.6	Localización del acuífero del Distrito de Riego 023	42
6.1	Esquema del Distrito de Riego elaborado en el módulo SimGes	50
6.2	Serie histórica de volumen de agua que entra a las presas San Ildefonso y Constitución de 1917	47
6.3	Serie histórica de extracciones de agua que entra a las presas San Ildefonso y Constitución de 1917	47
6.4	Análisis de las demandas consuntivas periodo 2005-2012.	49
6.5	Elementos internos que conforman el esquema de la red de flujo	51
6.6	Serie histórica de almacenamiento de la presa San Ildefonso	52
6.7	Serie histórica de almacenamiento de la presa San Ildefonso	53
7.1 a	Simulación para déficit y volumen final del embalse	54
7.1 b	Simulación para déficit y volumen final del embalse	55
7.2 a	Simulación para el Escenario 1)	56
7.2 b	Simulación para el Escenario 1)	57
7.3	Simulación para el Escenario 2)	58
7.4 a	Simulación para el Escenario 3)	59
7.4 b	Simulación para el Escenario 3)	60
7.5	Simulación con las demandas mensuales 2007-2008, Escenario 4)	61
7.6	Simulación con las demandas mensuales 2007-2008, Escenario 5)	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
4.1	Prospectiva de la inversión para riego agrícola en México, 2002-2005 (Fuente: conagua).	27
5.1	Precipitación normal mensual por RHA 1971-2000 (Fuente conagua).	36
5.2	Almacenamientos hidráulicos más importantes en el estado de Querétaro.	40
5.3	Características de los Drenes y Canales importantes.	42
5.4	Características físicas e hidráulicas de las presas.	43
5.5	Cultivos de riego agrícola del Distrito de Riego 023.	44
6.1	Variación del almacenamiento 2011-2012 de las presas del Distrito de Riego 023.	48
7.1	Demandas mensuales 2007-2008	60
7.2	Síntesis de los resultados de los escenarios propuestos	63

## 1. Introducción

El abastecimiento del agua y la agricultura están unidas íntimamente a procesos de alimentación para los seres humanos y son parte de los principales usos del agua, ya que de ellos depende su propia supervivencia. Un aspecto importante del agua que va cobrando relevancia en la actualidad es su naturaleza económica, el agua es considerada como un bien económico y también un recurso limitado que los sectores económicos utilizan para generar bienes de producción. En México, el uso del agua para la agricultura representa el 76.7%, siendo el sector que demanda la mayor cantidad de volumen del recurso (Estadísticas del Agua en México, 2011), y los productores y autoridades en México se ven en la necesidad de hacer un uso eficiente mediante tecnologías y optimización debido a su escasez.

En México la precipitación genera aproximadamente 1489 miles de millones de metros cúbicos de agua, del total un 73.1 % se evapotranspira, 22.1% escurre por los ríos y arroyos y el 4.8 % se infiltra recargando los acuíferos. El país cuenta anualmente con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Estadísticas de Agua en México, 2011).

Los Sistemas de Recursos Hídricos son un conjunto de elementos conformados por una o más cuencas que interaccionan de manera regular y dinámica, están compuestos por todos los recursos naturales que intervienen con sus aspectos físicos, químicos y biológicos donde el agua es el elemento principal y por otro lado los recursos humanos como el aspecto social, político, legal, económico y cultural. Una de las maneras de representar los sistemas es mediante los modelos hidro-económicos, los cuales combinan conceptos económicos e hidrológicos. Al inicio de los 70's los modelos comenzaron a relacionar la demanda económica con los Sistemas de Recursos Hídricos, y en la actualidad existen modelos híbridos de simulación y optimización para Sistemas de Recursos Hídricos grandes y complejos, hasta modelos que suministran el agua maximizando el beneficio para los usuarios (Álvarez-Mendiola, 2011).

## 1.1 Justificación

El agua es un bien básico e imprescindible para la vida, con un sentido de “bien social” más que económico. El fuerte aumento demográfico, junto al masivo proceso de urbanización, la expansión del sector agrícola, turístico y recreativo han llevado a situaciones cada vez más frecuentes de escasez del recurso y empeoramiento de su calidad (Figura 1.1.)



Fig. 1.1 Distribución de los volúmenes consuntivos, 2010. Fuente: SAGARPA.

Savenije (2001) consideró que aunque el agua es un bien económico, ésta tiene características especiales que la hacen diferente a otros bienes económicos, indica que el agua es esencial, escasa y finita, forma sistemas, es voluminosa, no sustituible, comercializable y compleja, lo que implica que en la asignación y su uso tendría que tomarse en cuenta una serie compleja de intereses económicos. Desde esta perspectiva, en la medida que el suministro del recurso hídrico sea escaso en relación con la demanda, el agua tendrá mayor o menor valor económico (Ward *et al.*, 2012).

La escasez del agua en el Medio Oriente y los conflictos sobre la propiedad y distribución del recurso entre Israel, Jordania y territorios Palestinos han inducido a los investigadores a darle

un valor económico al agua. Mediante el Water Allocation System (WAS 3.3, Fisher *et al*, 2005) se exploraron distintos escenarios para saber cuáles serían las consecuencias económicas, distribución del agua en la región, producción adicional de agua para cubrir las demandas, disposiciones para los años de sequía, asignación de costos y beneficios y aumentos de precio a los consumidores. Las variables importantes fueron el crecimiento de la población y la propiedad del agua, siendo que la consecuencia de la primera es el aumento en la demanda de agua y la segunda afecta la disponibilidad del agua. Las simulaciones se hicieron suponiendo un acuerdo en ambas partes para el año 2010 y los resultados del estudio indicaron que los palestinos deberían disponer de cantidades adicionales de agua, y los beneficios podrían ser mayores mediante la cooperación de ambos países para determinar los derechos del agua. Se concluyó que los palestinos se les debiera asignar cantidades adicionales de agua de los recursos renovables de la zona, evitando la desalinización en la costa del Mediterráneo (Jayyousi, 2001).

En muchas ocasiones el precio del agua no refleja íntegramente su verdadero valor económico, por lo que las diferencias de entendimiento provocan que la infraestructura sea ineficiente, una asignación del recurso no apropiada para los diferentes usuarios del recurso, y que la protección al medio ambiente acuático sea insuficiente (Heinz, 2006). El precio del recurso está basado únicamente en la inversión de operación, conservación y administración (energía eléctrica, mantenimiento de instalaciones, operar los pozos, distribuir el agua, técnicos, etc.) que se necesita para hacer llegar el líquido hasta los usuarios que lo requieren, pero no se considera el precio que cuesta volver a recargar la cuenca de agua y reparar los recursos naturales afectados. Se han hecho estudios sobre el deterioro de los ecosistemas y su biodiversidad y señalan un escenario de profunda crisis ambiental, de continuar así las consecuencias serían catastróficas (Renner, 2002).

Los usuarios excepto los agrícolas realizan un pago por el uso, aprovechamiento o explotación de aguas propiedad nacional, sin embargo, en los últimos años la recaudación se ha mantenido constante mientras que los volúmenes son cada vez mayores. Las bajas eficiencias en el uso del agua, el desordenado crecimiento poblacional y la poca disponibilidad de agua han ocasionado que el recurso en ríos y lagos sean insuficientes en algunas zonas, y que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas.

El 76.7% del agua que se utiliza en México se emplea en la agricultura con una disponibilidad escasa en amplias zonas del territorio y la eficiencia de uso en el riego en general son bajas. Además, en los últimos años ha sido necesario incrementar la producción agrícola debido al aumento de la población, lo que vuelve crítica la situación.

La superficie dedicada a la agricultura en México es de aproximadamente 21 millones de hectáreas (10.5% del territorio nacional) de las cuales 6.5 millones son de riego y 14.5 de temporal, la primera genera más de la mitad de la producción agrícola nacional. El 88% del volumen de agua empleado en los distritos de riego proviene de fuentes superficiales que se almacenan en presas o se deriva de los ríos, el 12% restante corresponde a aguas subterráneas extraída de los acuíferos a través de pozos profundos, el agua es conducida a las parcelas a través de la infraestructura (canales y tuberías). Existen fuentes de abastecimiento superficial que están sobreconcesionadas o diversos acuíferos que están severamente sobreexplotados. El 35% de la infraestructura en el país que es utilizada para almacenar el recurso para abastecer a los distritos y unidades de riego corresponde a más de 40 años de antigüedad (la vida útil de diseño es de 50 años) lo que reduce su eficiencia (Programa Nacional Hídrico 2007-2012).

México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.46 millones de hectáreas, de las cuales el 54% corresponde a 85 distritos de riego, y el restante a más de 39 mil unidades de riego. Los DR (Distritos de Riego) son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación, e incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros. (Estadística de Agua en México, 2011).

Los productores y autoridades en México se ven en la necesidad de hacer un uso eficiente del agua mediante tecnologías y optimización debido a su escasez. El crecimiento acelerado de la población, el desarrollo industrial, el aumento de servicios y la agricultura ubicadas en el valle de San Juan del Río han provocado una competencia en el uso del recurso, lo que ocasiona sobreexplotación en la cuenca y en el acuífero. En la actualidad, la mayoría de los cuerpos de agua superficial se encuentran contaminados en mayor o menor medida, dependiendo de la cercanía con las fuentes emisoras de los contaminantes.

Se han desarrollado modelos hidro-económicos que tienden a valorar económicamente el recurso hídrico, estas herramientas pueden ser de utilidad para determinar medidas efectivas del costo del recurso que asegure el suministro, la prevención de avenidas y la instrumentación de medidas para la conservación de la calidad del agua (Ponencia “Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y su aplicación al Desarrollo Nacional, UNESCO, 2003).

El Sistema Soporte a la Decisión Aquatool utilizado en este trabajo es una herramienta desarrollada para la planificación y gestión de cuencas o de Sistemas de Recursos Hídricos, proporciona recursos para ayudar al análisis de diversos problemas relacionados con la gestión del agua (Andreu et al., 2005). El módulo SIMGES del Aquatool permite evaluar la fiabilidad y vulnerabilidad del sistema modificado por el usuario, dados unos escenarios hidrológicos, y predecir la eficiencia de las medidas adoptadas y de las estrategias, ha sido aplicado en casos de planificación y gestión de cuencas en España, Argentina y Chile, entre otros países con resultados satisfactorios. Por las características mencionadas anteriormente, disponibilidad de para usarse (gratis) y la bondad de poder adaptarse a los sistemas en México se decide usarlo para la Gestión del agua en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río.

## **1.2 Descripción del problema**

La ignorancia del valor económico del agua ha conducido al derroche y a la utilización del recurso con efectos perjudiciales para el medio ambiente. La gestión del agua como bien económico, es un método importante para conseguir un aprovechamiento eficaz y equitativo para favorecer la conservación y protección de los recursos hídricos. La agricultura de regadío contabiliza alrededor del 80% del agua consumida en el mundo y en muchos sistemas de riego se pierde hasta el 60% de agua desde su lugar de origen hasta su destino. El principal uso agrupado del agua en México es el agrícola el cual en términos de uso de aguas nacionales se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos. Con base en el VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (el último disponible a nivel nacional), la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.22 millones de hectáreas, de las cuales el 18% era de riego y el resto tenía régimen de temporal. El 66.2% del agua concesionada para el uso agrícola, acuicultura,

pecuario, múltiple y otros, es de origen superficial (Estadísticas del Agua en México 2011). En lo que respecta al aprovechamiento del agua, las eficiencias en el uso son aún muy bajas, ya que en el sector agrícola oscilan entre el 33 y 55%, en tanto que en las ciudades su valor fluctúa entre el 50 y 70%, además, no se ha logrado crear conciencia entre la población sobre la importancia y necesidad del buen uso, preservación y pago del agua.

### **1.2.1 Distrito de Riego 023, San Juan del Río**

En San Juan del Río, para el uso agrícola se extrae del acuífero 72'671,040 m<sup>3</sup>/año. Estudios recientes han demostrado que la evolución de los niveles de abatimiento han disminuido considerablemente del año 1985 al 2010, (la poca recarga del acuífero ha causado un abatimiento de aproximadamente 1.096 m. hasta 3.5 m. en un periodo inferior a un año, debido al exceso de extracción para riego. Además de la eficiencia de riego que llega a ser del 45 % y la escasa precipitación promedio al año ha mantenido en niveles bajos el almacenamiento de las cuatro presas que lo conforman y no se ha podido dar abasto para satisfacer las demandas que el campo requiere, es necesario hacer eficiente (mejorar el funcionamiento) el sistema para administrar de mejor manera el recurso disponible.

La actual escasez del agua y elevado costo que resulta extraer el recurso para consumo en el Estado de Querétaro y en otras partes del país, incentiva a eficientar (mejorar) los Sistemas de Recursos Hídricos para garantizar su disponibilidad.

### **1.3 Hipótesis**

Es posible simular el modo de gestionar el recurso hídrico en el Distrito de Riego 023 (como parte del sistema de recursos hídricos) con la finalidad de proponer una gestión eficiente que minimice los déficits de los recursos disponibles.

### **1.4 Objetivos**

Con base a la hipótesis planteada, se proponen tanto el objetivo general como el particular.

#### **1.4.1 Objetivo general**

Simular la Gestión del recurso hídrico en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, con el fin de revisar la eficiencia actual del sistema para beneficio de sus diferentes usuarios, mejorando las políticas de operación de todo el sistema para administrar de manera adecuada el recurso disponible. Distrito 023.

#### **1.4.2 Objetivos particulares**

- En base a la información obtenida, simplificar el Distrito de Riego 023 para una óptima operación en el AquaTOOL.
- Analizar las series de datos que corresponden al balance hídrico para conocer el comportamiento en el tiempo.
- Simular el funcionamiento del DR 023 para conocer el déficit en el tiempo, con los resultados obtenidos conocer los periodos más vulnerables a las demandas de agua por los usuarios.
- Realizar distintos escenarios según los resultados, basados en la reducción de las demandas, con la finalidad de mitigar el déficit en cada uno de los módulos.
- Comparar los resultados obtenidos observando la posible disminución del suministro del agua a la demanda.

## 2. Antecedentes

El agua es vital para la vida en la Tierra, es por ello que sus usos están directamente relacionados con todo aquello que enriquezca y beneficie el desarrollo del ser humano y el medio ambiente que lo rodea. Las grandes comunidades han tenido la necesidad de abastecer de agua a sus pobladores y el hombre ha desarrollado sistemas físicos que permiten transportar agua y de esta manera satisfacer las demandas de manera eficaz (Álvarez-Mendiola, 2011).

El abastecimiento del agua y la agricultura están unidas íntimamente a procesos de alimentación para los seres humanos y son parte de los principales usos del agua, ya que de ellos depende su propia supervivencia. En la medida que las sociedades humanas se han desarrollado, han surgido nuevos usos del agua. Al aprovechar las propiedades físicas y químicas del agua el ser humano ha podido utilizarla en procesos de tipo industrial los cuales le proporcionan bienestar y seguridad. Nace entonces el uso de tipo industrial (Álvarez-Mendiola, 2011).

Una vez que el hombre ha sido capaz de producir bienes para su propia satisfacción, los pone a disposición de la sociedad y los empieza a comercializar, surge así la industria del comercio, la cual también requiere agua y por lo tanto se le atribuye el uso comercial (Álvarez-Mendiola, 2011).

En resumen, el agua puede ser usada para:

- Abastecimiento
- Agricultura
- Industria
- Comercio
- Ganadería

## **2.1 Los Sistemas de Recursos Hídricos**

Los Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) son un conjunto de elementos de una o más cuencas que interaccionan de manera regular y dinámica. Dichos elementos están conformados por todos los recursos naturales que intervienen con sus aspectos físicos, químicos y biológicos en el que el agua es el elemento principal y por otro lado los recursos humanos como el aspecto social, político, legal, económico y cultural. Los SRH son útiles como medio de transporte de cargas de todo tipo, incluso de residuos, sirven como fuente generadora de energía que se aprovecha en los asentamientos humanos o industrias; se utilizan como el medio de disolución de carga contaminante o de desecho de las industrias con el fin de minimizar las afectaciones en los usuarios del recurso aguas abajo, dan vida a la flora, la fauna y a los seres humanos, se utilizan también como agente refrigerante o transmisor de calor; además, se usan como elemento recreativo y de esparcimiento.

Por otro lado, los SRH deben conservar el estado ecológico del agua y del entorno para que no se provoquen daños al medio ambiente y satisfagan la normativa de calidad necesaria para que el recurso hídrico satisfaga en calidad y cantidad las demandas agrícolas, urbanas e industriales. El estilo de vida y las tradiciones de una parte de población, darán como consecuencia que se asigne siempre un valor de tipo social al agua. Hoy en día el recurso hídrico juega un papel muy importante en las decisiones políticas y sociales de una entidad, en la asignación del recurso se toma en cuenta la afectación o beneficio que se le puede proporcionar a cierto núcleo de población de utilización de agua (Álvarez-Mendiola, 2011).

## **2.2 Los Modelos Hidroeconómicos**

Los modelos hidro-económicos unen conceptos hidrológicos y económicos, fueron desarrollados para valorar económicamente el recurso hídrico, y pueden ser de utilidad para determinar el costo del recurso asegurando el suministro, la prevención de avenidas y la instrumentación de medidas para conservar la calidad del agua. Ibáñez *et al* (1997), presentó una metodología para planificar la operación de un sistema de riego en el noroeste de México, mediante la combinación de programación lineal y simulación con lo cual se maximizó el rendimiento neto

de los agricultores tomando en cuenta las restricciones del sistema, la disponibilidad de agua y la tierra, y las restricciones de transferencia del agua. Los modelos de simulación fueron desarrollados para la planificación mensual del Sistema en un periodo de un año. El modelo tomó en cuenta la continuidad de almacenamiento, las entradas netas, la evaporación neta, capacidades de los canales principales, requerimientos de tierra y agua para los cultivos, principalmente. Gracias a este modelo los responsables de la operación del sistema pueden generar sus reglas de operación propia de cada año según sus pronósticos hidrológicos, volumen de almacenamiento inicial, y un patrón elegido de corte, que es variable cada año.

En el norte de Irán se realizó un estudio donde la escasez de agua para el riego promovió el desarrollo para nuevas gestiones y mejora en el abastecimiento, considerando los aspectos técnicos, sociales, ambientales, institucionales, políticos y financieros. En esta zona, como en otras partes del mundo, la demanda en el riego ha ido en aumento y disminuyendo la cantidad de agua, los objetivos en los que se concentró el proyecto son: la regulación de agua, mejora en la producción de arroz, té y sus necesidades ambientales. Se utilizó el software GAMS. Los resultados de la aplicación del programa al sistema de riego fueron beneficiosos con la asignación óptima del agua entre los diversos campos y cultivos, en los años húmedos, concluyendo que se debería asignar más agua a los campos de arroz en desarrollo (Zarghaami, 2006).

En cuanto al valor del agua, se han hecho estudios (Castellano *et al.*, 2008) para establecer un rango de precios ambiental y socialmente óptimos en la agricultura. En Navarra España se desarrolló un método para establecer precios del agua y los efectos de estos con la finalidad de ofrecer a los responsables políticos opciones ecológicas y óptimas en cuestión de precios en regiones de riego. El precio medio óptimo se calculó mediante un modelo económico basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) lo que permitió la cuantificación y valoración económica del costo ambiental del agua y el precio óptimo se calculó mediante una curva de demanda de agua de riego, tomando en cuenta el aspecto social de manera que se observó si la economía regional puede aceptar los precios más altos propuestos sin afectar el PIB (Producto Interno Bruto) regional. Los resultados de los precios obtenidos fueron desde precios que minimizaron el impacto negativo en la economía hasta los que reflejaron el costo ambiental del agua. El rango de valores correspondiente proporciona una aproximación para establecer el precio máximo que podrían

cobrar los agricultores sin afectar la economía de la región, los aspectos que proporcionaron el valor del agua son el volumen, calidad y peligro biológico. El modelo puede ser aplicado en regiones en donde existe un conflicto en la asignación del agua en territorios fronterizos.

Las políticas relacionadas con los recursos hídricos tienen efectos en los procesos hidrológicos, y además en el aspecto económico y social, ya que se relacionan entre ellos. El OpenMI es un modelo que fue desarrollado en base a otros modelos ya existentes, el resultado integró un modelo hidro-económico para aguas subterráneas, el cual estudia los efectos de las políticas del agua en los sistemas de riego agrícola para evaluar el impacto de las alternativas de las políticas del uso, con el fin de reducir el volumen de suministro en zonas semi-áridas. El caso de estudio se realizó en el Acuífero Ogallala, EE.UU, el cual ha sido utilizado para riego agrícola durante 50 años, disminuyendo el acuífero hasta 30m en algunas áreas afectando la ecología, economía y el paisaje. Se realizaron simulaciones que captaron la dinámica que existe entre los procesos en los sistemas de riego agrícola considerando dos políticas para limitar el uso del agua a niveles sostenibles: regulando el consumo de agua, y ofreciendo un incentivo a la comunidad basado en el historial de pagos por agua. La prioridad fue disminuir el consumo total de agua en un 34% para que pueda coincidir con la recarga natural al acuífero, los resultados de las políticas adoptadas mostraron un descenso del nivel de agua máximo de 9,8 m en comparación a la media de 22,1 m registrada. Se lograron niveles aceptables de consumo de agua subterránea en relación a la productividad económica, impacto ambiental y la variación espacial a lo largo de la región (Bulatewicz *et al.*, 2010).

La cuenca del río Zambezi tiene relevante importancia por los recursos naturales, la producción de alimentos y la energía que se produce y a pesar de ello no existe un acuerdo legal en torno a la distribución del agua y las políticas de asignación eficientes que puedan aplicar los responsables políticos. En la modelación hidro-económica se consideró la infraestructura existente y planificada del sistema de riego de la cuenca, se utilizó una técnica de optimización para la toma de decisiones de problemas secuenciales mediante SDDP que es una extensión de Discrete Stochastic Dynamic Programming (SDP) la cual ayuda a resolver los problemas de optimización y las variables de decisión son elegidas a fin de maximizar los beneficios a corto y largo plazo. Los resultados indicaron que el valor del agua varía espacialmente dependiendo de los cambios en la

elevación y la ubicación de las presas existentes o propuestas, (Tilmant *et al.*, 2012).

Los modelos hidroeconómicos tienen implicaciones políticas y usos en diversas áreas: infraestructura, expansión y planificación de las operaciones, asignación del agua y de los mercados, vías de adaptación (por ejemplo, al cambio climático), diseño de las políticas institucionales para lograr los objetivos ambientales, sociales y económicos (gobierno, derechos, etc.) política económica, análisis de impacto, y base de la reglamentación y la legislación, representan los sistemas teniendo como componentes básicos los flujos hidrológicos, la infraestructura de gestión del agua, demandas económicas del agua, costos y reglas de operación (Harou *et al.*, 2009).

### **3. Gestión de un sistema de recursos hídricos mediante un modelo de simulación**

#### **3.1 La gestión y planificación**

En México la gestión pública del manejo del agua ha demostrado ser deficiente respecto a sus objetivos, siendo una política poco clara y conveniente para la sociedad, y la capacidad técnica ha dejado gran destrucción en el medio ambiente y corrupción, es necesario hacer un cambio en las políticas para avanzar en el desarrollo económico y una gestión sostenible en el medio ambiente (Barkin, 2011). Las políticas y las instituciones que rigen la industria del agua no facilitan la mejora de los resultados en la gestión, éste sería el motivo principal de problema del agua y no así la escasez (Aguilera, 1992).

La industria del agua es afectada por las inadecuadas gestiones políticas que la dirigen y al no operarse de manera óptima los usuarios no reciben un servicio oportuno. Estas gestiones son el resultado de las decisiones que se toman desde el ámbito de la política de la administración pública. Las políticas que rigen la manera de pensar de los usuarios respecto al agua, la mayor parte del tiempo depende mucho del sentir acerca de ella, esto hace pensar sobre la imagen que los usuarios tienen de este recurso y la manera que esa forma de pensar puede afectar a los objetivos finales.

El agua se diferencia de otros recursos naturales en tres aspectos (Aguilera, 1992):

- Efecto externo. El agua fluye, lo que da origen a distintos cambios físicos y químicos (cantidad y calidad) debido a la utilización que se le pueda dar y de cierta manera afectan a otros usuarios del recurso en otro lugar.
- Es cíclica.- El agua superficial que no es consumida se infiltra o se evapora lo que permite que su volumen se recupere y esté disponible continuamente para utilizarse posteriormente, aunque la calidad no sea la misma.
- Consumo colectivo.- Muchos de los productos obtenidos gracias al agua se pueden disponer, el productor de los mismos no puede retirarlos del consumo hasta que obtenga su precio, a diferencia de lo que ocurre con otro tipo de recursos naturales.

Como se mencionaba anteriormente, los usuarios del recurso tienen una imagen de lo que significa para ellos el agua, creando imágenes falsas como lo son la imagen del agua como medio de supervivencia: el ser humano puede sobrevivir un breve periodo racionando un litro de agua al día, y a largo plazo un poco más, sin embargo, la creencia de que se necesita para sobrevivir 3.5 litros al día por persona es falsa, y es la cantidad que se consume y está disponible por persona en un hogar urbano medio; dicha cantidad utilizada para usos personales en las ciudades modernas no es una necesidad, sino una preferencia. La imagen del fundamentalismo del riego está basada en la idea de que la agricultura es la “piedra angular” de una sociedad realizable en zonas desérticas o semi-desérticas, y en donde se necesita del riego para la agricultura con el fin de obtener productos de consumo. De ahí se tiene la idea que el riego y el agua que se utiliza es un requisito absoluto en un medio desértico para el desarrollo en una sociedad. Por otro lado, la imagen del desierto se basa en el concepto de que el agua es escasa en el desierto, pero la economía debiera y pudiera pagar por la adquisición (explotación e importación) del recurso, si es que vale la pena. Existe también la imagen recreativa: relacionada con actividades como la pesca, la navegación o la natación, las actividades recreativas como son golf, espacios para aves, campamentos, etc.

Por otro lado se maneja el concepto de que el agua es un bien de uso libre y por lo tanto se considera como un bien gratuito por la naturaleza por lo que los usuarios sólo deben pagar el costo de suministro y producción, sin considerar el costo de la retribución del recurso a la naturaleza. Estas imágenes son las que determinan el valor final que recibe, ya que de esto dependen las políticas de su gestión y que la misma sociedad rige. La falta de conciencia en los consumidores y de indicadores de precios, orilla a una sobreexplotación del recurso y a ser asignada de tal manera que no costara prácticamente nada. Esta situación conduce a una inadecuada asignación del agua a corto plazo para usuarios y a largo plazo en el desarrollo de los usos.

Existen zonas con aguas superficiales que se encuentran explotadas al límite de lo permitido, sin embargo, los acuíferos que aún no han sido explotados son vistos como una fuente importante de agua para satisfacer la demanda, pero con una visión de bajo costo y accesibilidad. Las aguas subterráneas son un recurso que se puede acabar si no se controla su explotación, siendo esta irremplazable. Muchos de los usos que se le da al agua más que necesidades o requisitos son preferencias, se necesita tomar conocimiento de lo que cuesta obtener el recurso para poder

valorarlo como tal, y de ésta manera también las políticas de la gestión tomen un enfoque distinto para poder preservarlo.

Este análisis para la planificación hidrológica requiere la participación del aspecto político, legal y socioeconómico, además, para la práctica se requiere utilizar modelos capaces de analizar y asociar todos los aspectos del ciclo hidrológico y del sistema de recursos hidráulicos que intervienen, de tal forma que puedan reproducir el funcionamiento de los elementos involucrados (unidades de demanda, almacenamiento y conducción, los distintos flujos de agua en los canales, conducciones y ríos y acuíferos) y la manera en que interactúan. Estos modelos requieren ser calibrados por un período amplio que garantice su buen funcionamiento.

El ahorro del agua se entiende cómo utilizar menos recurso mediante una mayor eficiencia en los métodos de riego (desaprovechando lo menos posible) evitando pérdidas en las tuberías. El uso de aguas residuales es otra manera de conservación. Una operación adecuada de un sistema de recursos hídricos contempla reservar agua para temporada de secas; durante estas temporadas se ha demostrado que es posible restringir significativamente las dotaciones sin que esto sea un problema, se aconseja concientizar a los consumidores en su uso.

Se ha estudiado la cuenca del río Conchos (Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua) con el fin de mejorar la operación y manejo del agua, ya que es una zona con escasez de agua y periodos extensos de sequía. La finalidad es proponer políticas de extracción del recurso para mejorar la eficiencia, utilizando modelos matemáticos para gestión (Palacios, 1989) basándose en tres fases: analizar las políticas actuales de extracción de agua en las presas, determinar las reglas de operación del sistema y validar las reglas definidas por medio de una simulación. Los resultados indicaron que en la manera de operar el agua de las presas no se siguió una política de extracción, sustrayendo distintos volúmenes para un mismo volumen almacenado de agua (Ortega-Gauchin, 2012).

La gestión sustentable del agua para riego debe cumplir dos aspectos fundamentales: preservar el entorno natural y mantener la agricultura. En la región del Mar de Aral, Asia Central, existe un conflicto entre ambos aspectos; la salinidad y los cambios de caudal aguas arriba afectan

el medio ambiente, además de que en los últimos años se ha reducido considerablemente la precipitación. Los sistemas de riego en esa zona son de baja eficiencia, por lo que es necesario una gestión que utilice mejor los recursos hídricos existentes y considerar el uso sustentable a largo plazo, incluyendo la reducción en la calidad del agua y la salinización. En la región de Mar de Aral la actual agricultura de regadío es insostenible debido a la degradación del agua y la salinidad del suelo; se necesita un cambio en el tipo de cultivo como en superficie, hacer mejoras en la infraestructura y penalizar en forma económica las descargas de sal (X. Cai *et al.*, 2003).

Aproximadamente 272 millones de hectáreas de cultivo son regadas en el mundo, en la India, la práctica del riego actual es del 30-35% de eficiencia (Mishra *et al.*, 2005). La falta de agua para riego debido a la escasez no satisface las demandas para la agricultura. Es complejo realizar un programa óptimo en condiciones de déficit, ya que depende de factores como la humedad del suelo en el momento del riego, la etapa de crecimiento del cultivo, el efecto de irrigaciones anteriores y posteriores en el crecimiento y rendimiento del cultivo, y las condiciones climáticas. Mediante el modelo ORYZA2000 de simulación de cultivos de crecimiento, se utilizó en un caso de estudio en la India, en el cual se logra hacer asignaciones de agua para la planta en etapas prioritarias de crecimiento, que es cuando más requiere agua para su desarrollo, y de esta manera se puede conseguir eficacia en el uso del agua (Soundharaja *et al.*, 2009).

### **3.2 Objetivos de la gestión y planificación de un sistema de recursos hídricos**

La gestión implica todas aquellas diligencias conducentes al logro de que un Sistema de Recursos Hídricos funcione eficaz y eficientemente. Se gestiona un sistema de recursos hídricos a corto plazo. (12, 24, 36 meses). El plazo depende de los organismos operadores institucionales y de las políticas de gestión.

Planificar significa realizar un plan o proyecto de una acción; para el caso de los Sistemas de Recursos Hídricos (SRH), significa planificar todas aquellas acciones que conduzcan a la realización de los mismos para el mejor aprovechamiento del agua. Por lo general se planifica a largo plazo.

La planificación se concentra en resolver distintos problemas. En Pakistán el problema a resolver es el desarrollo de los proyectos de riego, salinización y el drenaje que produce el aumento de nivel de los acuíferos. En Arizona el interés está en la sobreexplotación de los acuíferos y conseguir el trasvase del Río Colorado al centro y sur del estado.

La gestión del recurso (manejo del recurso) está en función de las políticas de operación de los Sistemas de Recursos Hídricos que los organismos operadores de cada país hayan fijado para el “buen” uso del recurso hídrico. Así por ejemplo en México, el volumen de agua que se utiliza para el riego (en los distritos de riego) está concesionado a los agricultores de acuerdo a las demandas que los mismos piden al gobierno. Las concesiones están determinadas por un volumen de agua al año, sin importar si se utiliza o no el recurso. Lo anterior supone un posible derroche del agua y un manejo ineficiente del mismo, lo cual produce deterioro en los beneficios finales que los agricultores tendrán con el producto de sus cosechas (Álvarez-Mendiola, 2011).

Un caso de planificación integral de los recursos hídricos es El Plan del Agua de California. Este plan tiene como objetivos principales satisfacer las demandas de riego, urbana, industrial, control de calidad del agua, contaminación, control de inundaciones, producción de energía hidroeléctrica y la protección de los usos recreativos del agua. En dicho Plan, se analiza la existencia del agua y sus reservas, así como las posibles nuevas fuentes del recurso (sobreexplotación de acuíferos) y la reutilización de aguas residuales y excedentes salinos de los drenajes que proceden del riego, en temporadas con déficit se propone operar los sistemas mediante reglas de operación eficientes (Sahuquillo, 1993).

La planificación realizada en México propuso regar 10 millones de hectáreas de superficie en el año 2000, además de satisfacer las demandas, control de inundaciones, la producción de energía eléctrica, saneamiento y calidad del agua, medio ambiente y la estimación de los efectos de la contaminación de los recursos. Se consideró incorporar las aguas subterráneas en la planificación y plantear la problemática de la sobreexplotación de las zonas áridas de México.

Algunas acciones en la planificación hidrológica (Sahuquillo, 1993) son las siguientes:

- Inventario y análisis de las demandas de agua y problemas existentes y previsión de su evolución futura.

- Inventario, previsión y análisis de los recursos disponibles. También incluye el inventario de los sistemas de aprovechamiento de recursos existentes (presas, canales, pozos, elementos de recarga artificial, plantas de tratamiento, etc.).
- Formulación de planes alternativos para satisfacer las demandas de agua actuales y futuras con los recursos hídricos disponibles para resolver problemas existentes y futuros.
- Evaluación de los efectos de los planes alternativos; comparación de los mismos y selección de una o varias alternativas.

### **3.3 Fundamentación de la Gestión de un sistema de recursos hídricos**

Con el fin de lograr una gestión óptima de un sistema de recursos hídricos, es necesario representar todos los elementos que lo conforman y que se utilizan para poder suministrar el recurso hídrico a los usuarios que lo demanden.

Los elementos que conforman un sistema de recursos hídricos y que se utilizan en el modelo SIMGES son los siguientes:

- Presas o embalses superficiales, con sus respectivas características físicas e hidráulicas
- Canales, tramos de río o cualquier conexión entre ellos
- Demandas consuntivas (mes a mes).
- Elementos de retorno al sistema
- Demandas no consuntivas
- Recarga artificial
- Bombeos

- Nudos
- Tomas
- Demandas
- Acuíferos

Una vez conformado el esquema de simulación, el modelo internamente construye una red de flujo conservativa para el sistema, por medio del planteamiento de un modelo de optimización, realizando un proceso iterativo para los flujos no lineales existentes (evaporación de los embalses y reglas de operación como indicadores de alarma en caso de falta de agua en los embalses, por ejemplo).

Para resolver la optimización de toda la red se utiliza, para cada mes, la función objetivo siguiente:

$$T_E + T_{R1} + T_{R2} + T_{R3} + T_{R4} + T_{R5} + T_{DC} + T_{DN} + T_{RA} + T_{BA} \quad (1)$$

donde:

- $T_E$  término debido a embalses
- $T_{R1}$  término debido a tramos de río tipo 1
- $T_{R2}$  término debido a tramos de río tipo 2
- $T_{R3}$  término debido a tramos de río tipo 3
- $T_{R4}$  término debido a tramos de río tipo 4
- $T_{R5}$  término debido a tramos de río tipo 5
- $T_{DC}$  término debido a demandas consuntivas
- $T_{DN}$  término debido a las demandas no consuntivas
- $T_{RA}$  término debido a recargas artificiales
- $T_{BA}$  término debido a bombeos adicionales

de donde:

$$T_E = \sum_{i=1}^{nemb} \left( \left( \sum_{j=1}^4 V_{ij} C E_{ij} \right) + P_i CV \right) \quad (2)$$

donde:

$nemb$  número de embalse

$V_{ij}$  volumen al final del mes en cada zona  $j$ ,  $j=1,2,3$  y  $4$ , del embalse  $i$ . La zona 1 es la zona de reserva, la 2 la zona inferior, la 3 es la zona intermedia, y la 4 es la zona superior

$P_i$  son los vertidos del embalse  $i$

$CE_{ij}$  es el costo ficticio asociado al volumen embalsado en la zona  $j$  y está dado por:

$$CE_{ij} = k_j + NP_i \quad (3)$$

donde

$k_j$  son valores preestablecidos ( $k_1 = 1700$ ;  $k_2 = 1100$ ;  $k_3 = 1000$ ;  $k_4 = 700$ )

$NP_i$  número de prioridad asignado al embalse

$CV$  costo ficticio asociado al vertido ( $CV = 100$ )

Para las conducciones Tipo 1 (tramos de ríos y canales) la red se rige por la ecuación:

$$T_{R1} = \sum_{i=1}^{ntr1} (D_i CD_i + (Q_i - Q_i^{min}) * CQ_i) \quad (4)$$

donde:

$ntr1$  número de tramos tipo 1

$Q_i$  caudal que circula por el tramo de río tipo  $i$ .

$D_i$  déficit respecto al caudal mínimo declarado

$$D_i = \begin{cases} Q_i^{min} - Q_i & \text{si } Q_i^{min} > Q_i \\ 0 & \text{si } Q_i^{min} \leq Q_i \end{cases}$$

$CD_i$  costo ficticio asociado al déficit de caudal mínimo

$$CD_i = KD - NP_i \quad (5)$$

donde

$KD$  valor constante ( $KD = 1700$ )

$NP_i$  número de prioridad asignado al caudal mínimo del tramo de río  $i$

$CQ_i$  costo ficticio asociado al caudal que circula por el tramo de río  $i$

Para las demanda consuntivas, la red trabaja internamente mediante la siguiente expresión:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left( D_i CK + \sum_{t=1}^{nto} (S_{ti}(CT_{ti} + 1) - DS_{ti}CT_i) \right) \quad (6)$$

donde

$ndc$  número de demandas consuntivas

$D_i$  déficit sobre la demanda total de la zona  $i$  en el mes en cuestión

$CK$  costo ficticio constante asociado a los déficits de las zonas de demanda ( $CK = 750$ )

$nto_i$  número de tomas de la demanda  $i$

$S_{ti}$  suministro bruto a la toma  $t$  de la demanda  $i$

$DS_{ti}$  déficit al suministro bruto mínimo calculado por el modelo

$$CT_{ti} = CTC + (NP_{ti} - 1)CDC \quad (7)$$

donde:

$CTC$  valor constante ( $CTC = 750, CDC = 5$ )

$NP_{ti}$  número de prioridad de la toma  $t$  de la demanda  $i$

La función objetivo para los bombeos adicionales está dada por:

$$T_{BA} = \sum_{i=1}^{nba} (QB_i CB_i) \quad (8)$$

donde:

$nba$  número de bombeos adicionales

$QB_i$  caudal bombeado por la instalación  $i$

$CB_i$  costo ficticio asociada a la instalación  $i$

$$CB_i = CTC + CK - (NP_i - 0,5) * CDC \quad (9)$$

donde

$CTC, CK, CDC$  son los mismos valores dados en demandas consuntivas

$NP_i$  número de prioridad correspondiente al grupo isoprioritario hasta el cual se quiere suministrar

La gestión de los recursos hídricos se realiza mediante reglas de operación que reproducen las políticas de operación de cada uno de los embalses, usando reglas de explotación en las zonas de depósitos superficiales, indicadores y restricciones. El modelo AquaTool (modelo de Soporte a la Decisión, SAD) por medio del módulo interno SimGes, simula la gestión o modo de operar de un sistema mediante sus elementos de almacenamiento superficiales, captación, transporte, utilización y/o consumo, y dispositivos de recarga artificial a escala mensual. Internamente se realiza una reasignación del agua con el objetivo de minimizar los déficits para cada una de las demandas basándose en prioridades establecidas (reglas de operación) para los distintos elementos que conforman el esquema del sistema de explotación.

### 3.4 La Simulación

La simulación de la gestión del Sistema de Recursos Hídricos se inicia con la caracterización de todas las componentes relevantes involucradas en el sistema:

- Presas o embalses.- Se incluye las aportaciones que llegan a éstas por medio de los escurrimientos de la cuenca y los volúmenes que llegan de otras presas, sus volúmenes máximos, volúmenes objetivo y su prioridad respecto a las otras presas.

Internamente, SimGES trabaja mediante un balance de masas para obtener el volumen final para cada embalse, y está dado por la expresión:

$$V_f = V_i + A_e + A_a - P_f - E - S_c - S_v \quad (10)$$

donde:

$V_f$  Volumen final

$V_i$  Volumen a principio de mes

$A_e$  Aportación del embalse

$A_a$  Aportaciones aguas arriba del embalse

$P_f$  Pérdidas por infiltración

$E$  Pérdidas por evaporación

$S_c$  Seltas controladas (no sobrepasan la capacidad de desagüe del embalse)

$S_v$  Vertidos (desembalses producidos por superar la capacidad máxima)

- Conducciones.- Los canales o conexiones que intervienen para que el recurso llegue hasta el sitio de cada demanda, con sus capacidades máximas y caudales mínimos clasificándose dependiendo de sus características en:
  - - Tipo 1.- Canales o tramos de río
    - Tipo 2.- Conducciones las cuales reportan pérdidas por filtración
    - Tipo 3.- Existe una conexión hidráulica entre el río y un acuífero, con flujo del río al acuífero y viceversa.
- Demandas consuntivas.- Se refiere a los elementos que utilizan agua del sistema para consumo de tal manera que el agua no retorna al sistema, se incluyen las demandas para riego, urbanas e industriales, con sus parámetros de consumo respectivamente. Se obtienen las demandas mensuales para cada zona regable, aumentando o disminuyendo los volúmenes dependiendo de cada mes y de la temporada de riego. El agua consumida está dada por la expresión:

$$X = \beta \times S_{\text{sup}} \quad (10)$$

- Elementos de retorno.- Son puntos de reintegro del agua al sistema, en este caso no aplica, ya que no existen excesos en los caudales que pudiesen ser reintegrados al sistema de algún modo.
- Demandas no consuntivas.- Los elementos que utilizan el agua sin consumirla, como son las Centrales Hidroeléctricas, el sistema no admite este tipo de demandas, debido a que el recurso es utilizado exclusivamente para riego.
- Recarga artificial.- Los elementos que recargan el acuífero.
- Bombeos adicionales.- Los elementos de extracción de agua no se almacenan superficialmente, en este caso se incorporan directamente al cauce de cada canal.
- Acuíferos.- El tipo de acuífero corresponde al Unicelular, ya que está hidráulicamente conectado con el sistema superficial. Las variables que corresponden son: un coeficiente de desagüe  $\alpha$  y las siguientes ecuaciones:

$$V_n = V_{n-1}e^{-\alpha} + \frac{R_n}{\alpha}(1 - e^{-\alpha}) \quad (11)$$

$$Q_n = \alpha V_n = Q_{n-1}e^{-\alpha} + R_n(1 - e^{-\alpha}) \quad (12)$$

donde:

$V_n$  Volumen final del mes

$V_{n-1}$  Volumen final del mes anterior o inicial

$\alpha$  Coeficiente de desagüe

$R_n$  Recarga del mes

$Q_n$  Caudal de relación río acuífero

- Los nudos no se consideraron elementos del sistema, pero fue importante localizarlos para los siguientes casos:

- secciones en donde confluyen y/o partan de él diferentes secciones de río o conducciones
  - puntos en donde se incorporen una aportación, retorno o bombeo
  - puntos destinados a recarga artificial o cuando exista demanda
  - puntos de cambio de las características de río o conducción
- 
- Indicadores de alarma.- Son las reglas de operación del sistema, tienen como función reducir el consumo de agua cuando las reservas hidráulicas del sistema se encuentra por debajo de los límites establecidos previamente. El coeficiente de restricción puede ser distinto para cada mes del año. También se puede optar por hacer el cálculo en base al valor de volumen de reservas a principio de mes, o que se utilice como un umbral mínimo de manera que evitar bajar las reservas existentes por debajo de dicho umbral. Iterativamente se trató de no rebasar el umbral con el suministro definido previamente, de manera que si la diferencia entre el volumen disponible y el volumen inmediato es pequeño, se calcula un suministro por el que el umbral no sea superado.

#### 4. Economía de los recursos hídricos

La Economía estudia la satisfacción de las necesidades humanas mediante bienes que a pesar de su escasez tienen usos alternativos entre los que se puede optar, si la escasez no existiera no tiene sentido hablar de Economía (Álvarez-Mendiola, 2011).

La mayoría de los autores coinciden en señalar la década de 1970 como punto de partida a la hora de hablar de la economía de los recursos naturales o economía ambiental. El sector del agua no es independiente, sino que está cada vez más relacionado con sectores como la agricultura, la energía, la industria o el transporte, por lo que las políticas relativas al agua no pueden plantearse en términos hídricos solamente (Sevilla *et al.*, 2010).

El estudio de la economía trata la escasez de los recursos y la relación que existe con la demanda de los mismos por medio de procesos eficientes para lograrlo, por lo tanto, el agua es materia de estudio para la Economía (Sevilla *et al.*, 2010).

Además, ayuda a los administradores de agua a tener una perspectiva distinta en cuanto a la demanda de agua, esto mediante los derechos de agua, prioridades y proyecciones en el crecimiento de la población, sus necesidades de agua para el sector agrícola e industrial en relación con el concepto económico de valor. El agua va cambiando su valor económico según la cantidad disponible y el uso consuntivo que se le asigne (Harou *et al.*, 2009).

Separar el valor económico del uso del agua resulta complejo, como valor económico (expresado en monedas) depende de distintas circunstancias. Desde el punto de vista de producción resulta a un costo muy bajo, sin embargo, las inversiones de infraestructura que ésta requiere para su saneamiento y distribución son de alto valor. En la Conferencia sobre Agua y Saneamiento realizado en Dublín en 1992 se planteó la necesidad de reconocer el valor económico del agua. Por otra parte, las instituciones administrativas asocian la sustentabilidad con inversiones en infraestructura, pero el problema radica en la administración de los recursos ya existentes (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1** Prospectiva de la inversión para riego agrícola en México, 2002-2025. Fuente: conagua.

Concepto	Escenario		
	Actual	Tendencial	Sustentable
Hectáreas de riego modernizadas	0.8	1.1	5.8
Eficiencia en el uso del agua (% en pérdida)	54%	51%	37%
Distritos de Riego	62%	57%	45%
Unidades de Riego	45%	44%	26%
Demanda global de agua (Mm <sup>3</sup> )	56,210	58,098	58,346
Inversión anual en el sector (miles de millones de pesos)	14	16	30

### 3.2 Definición y conceptos de Economía del agua

#### Demanda de agua

El término “demanda” según Merrett (2004), se ha empleado con al menos cuatro significados diferentes en el contexto del balance hidro-social de una región, a saber:

Uso del agua.

Consumo del agua.

Necesidad del agua

Demanda económica del agua.

#### Uso del agua

Este significado se refiere a “la cantidad de agua por unidad de tiempo que recibe un cierto usuario”. El uso del agua, directa o indirectamente es la base de la vida humana y es uno de los dos grandes pilares del balance hidro-social en un año base o en un año futuro (escenario).

## **Consumo del agua**

Este concepto se refiere al agua que no queda disponible para su posterior reuso o devolución al medio hídrico. En el caso del uso agrícola, el término se refiere a la evapotranspiración. La evapotranspiración implica que el agua es consumida totalmente, lo cual es variable dependiendo del tipo de uso que se le dé al recurso.

## **Necesidad del agua**

La necesidad del agua para uso doméstico es un concepto relacionado con lo social, lo cultural y con la salud. Se refiere a niveles deseables o recomendados de uso para: beber, cocinar, asearse, realizar la limpieza de heces y orina, llevar a cabo la limpieza de la casa, el riego de jardines, y otros usos diversos.

Para el sector agrícola se refiere a los requerimientos netos de riego. Para la minería, la industria y otros sectores, la necesidad del agua es determinada técnica o institucionalmente.

## **Demanda económica del agua**

Para los economistas, el concepto demanda se refiere a la relación, para un tiempo dado y dentro de un mercado definido, entre el precio por unidad de cualquier producto o servicio y la cantidad en cada periodo de tiempo que los usuarios están dispuestos a adquirir a ese precio.

## **Disponibilidad de pago**

Desde el punto de vista de la Microeconomía, las curvas de demanda describen el comportamiento de los consumidores en función del precio de un bien.

Un aspecto importante en la economía del recurso hídrico es la disponibilidad de pago del usuario (Pearce y Turner, 1995). Esto está ligado a los beneficios que el usuario puede percibir del uso del recurso, el cual puede ser mayor al precio que tenga ese bien en el mercado. El usuario estará dispuesto a pagar hasta el momento en que el coste adicional por el uso de una unidad más del recurso alcance el beneficio adicional percibido por el uso de esa unidad adicional. Una vez construida la curva de demanda económica, la disponibilidad de pago o el valor del agua se puede encontrar fácilmente calculando la integral bajo esa curva (Gibbons, 1986).

La curva de demanda económica, entonces, puede describir la disponibilidad de pago (total y marginal) por el uso del recurso (Figura 4.1).

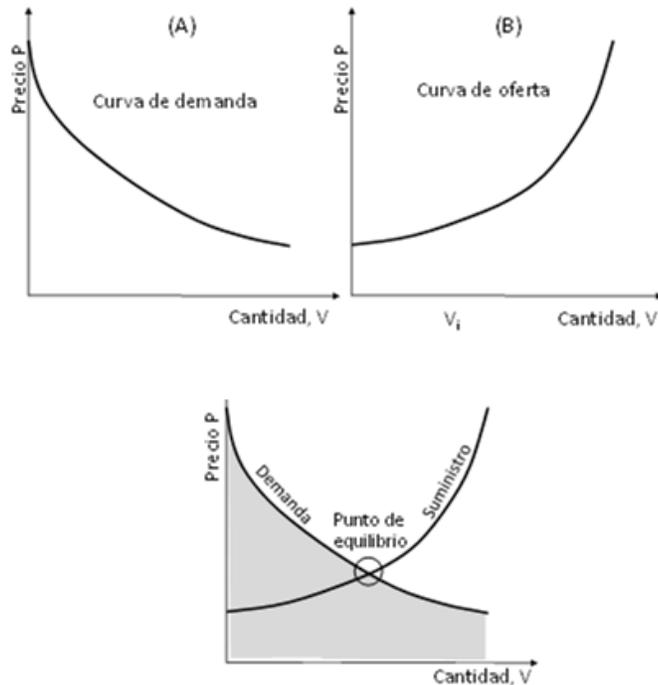


Figura 4.1 Curvas de oferta y demanda

Mientras que la curva de demanda indica el máximo precio que los consumidores pagarían por el agua, la curva de oferta (Figura 4.1B) indica el mínimo precio por el que los “productores del agua” están dispuestos a “vender” el recurso. Esto último representará el coste marginal del recurso. La curva de oferta también puede interpretarse como la máxima cantidad de agua que se puede obtener a un determinado coste. Al combinar las dos curvas, la de oferta y la de demanda, se pueden definir algunos conceptos útiles en la economía de los recursos hídricos (Figura 4.1C).

El cruce de ambas curvas se denomina punto de equilibrio y corresponde a la situación en que el suministro del recurso iguala a la demanda del mismo. En principio la Economía dice que cuando la demanda es mayor que la oferta (escasez), es porque el precio del agua es bajo.

## 4.2 El valor económico y los costos de los servicios del agua

Mediante los precios del agua se asignan los recursos a los distintos usuarios según la manera en que ellos valoren el bien o servicio. Se han desarrollado distintas metodologías para asignarle un precio al recurso, por ejemplo, en la agricultura Zilberman (2007) propone que los precios óptimos de cobro estarían basados en ciertos aspectos:

- Adoptando tecnologías de riego eficientes
- Mayor beneficio al medio ambiente
- La reducción de las superficies sembradas de cultivos de bajo costo
- Estabilidad en los sistemas hídricos

Existen distintos métodos para asignar precio al agua, los más utilizados son:

- Basados en la medición del volumen.- En este método se utilizan instrumentos de medición, se monitorean los volúmenes consumidos y con las autoridades encargadas de administrar el agua se establecen los precios.
- Métodos de medición no volumétrica.- Se utiliza cuando la medición de volumen no es viable, entonces el precio se establece de manera indirecta según el área o fijando una cuota. El costo se basa en de las características geológicas del acuífero, eficiencia de la bomba y el costo energético de extracción.
- Según el mercado de los derechos del agua.- Éste método permite intercambiar el agua voluntariamente total o parcialmente, además puede ser temporal o definitiva, se considera como una asignación eficiente y conservativa.

El subsidio por parte del gobierno federal ocasiona que las tarifas para uso agrícola sean muy bajas, al reducir el costo de la energía utilizada para su extracción en los pozos, lo que tiene como consecuencia aumentar los volúmenes de extracción por año. La extracción ilegal del recurso es otra situación que se presenta en México en el sector agrícola, además del poco control en su asignación (sólo el 39% de los usuarios tienen medidor para monitorear y controlar su consumo).

Las acciones mencionadas anteriormente dan como resultado poca eficiencia. Las instituciones encargadas de administrar el agua se encuentran más ocupadas en aumentar la infraestructura para obtener mayores cantidades de recurso, en lugar de administrar el suministro del agua existente. Para Bromley (1991) en el sector agrícola el precio que se le da al agua se encuentra subestimado, el país se beneficiaría cuando se logre darle su verdadero precio.

*Valor del agua.* Aunque se han mencionado dos corrientes fundamentales de valoración (intrínseca y antropocéntrica), existen al menos siete tipos de valores que puede alcanzar el agua según las perspectivas de valoración que los gobiernos en diferentes países asumen (Moss et al., 2003). Según estos autores, las perspectivas de valoración del agua son las siguientes:

- Valor ambiental.
- Valor social.
- Valor de salud pública.
- Valor de género.
- Valor político de bajo precio del agua.
- Valor en el uso de productos y la producción.
- Valor económico.

Centrándose en la perspectiva económica, el concepto de “valor” se basa en la economía neoclásica del bienestar, según la cual todas las actividades económicas en la sociedad están orientadas a aumentar el bienestar de los individuos, y son ellos quienes pueden valorar su propio bienestar. El valor del agua para un usuario es la máxima cantidad que ese usuario está en disposición de pagar por el uso del recurso (Briscoe, 1996). Para cualquier otro bien económico diferente al agua y que son intercambiados entre compradores y vendedores bajo una serie de condiciones establecidas, su valor puede calcularse como el área bajo la curva de demanda. Como los mercados de agua casi no existen y los que existen son imperfectos, es difícil calcular cuál es el valor del agua para diferentes usuarios. Existen muchos métodos para calcular el valor del agua en distintos usos finales (Gibbons, 1986) que incluyen los siguientes aspectos: definir las curvas de demanda y calcular el área bajo ellas; examinar las transacciones entre mercados; calcular las funciones de producción y simular las pérdidas de producción resultantes de contar con una unidad

menos de agua; calcular los costes de suministro de agua cuando no existe fuente disponible; y preguntar a los usuarios como valoran el recurso (valoración contingente).

El valor total del agua se puede considerar como la suma de una componente económica y el valor intrínseco (Rogers et al., 1998). La componente económica toma en cuenta cuatro aspectos en su integración: el valor que los usuarios otorgan al agua (disponibilidad de pago); los beneficios por retornos del recurso (recargas y disponibilidad aguas abajo); los beneficios indirectos de los usos del agua; y los ajustes necesarios para beneficios sociales. El valor intrínseco se compone de conceptos como el valor puro de existencia o el valor de legado de generación a generación, no fáciles de cuantificar pero que reflejan un valor real que se da en la mayoría de las sociedades humanas (Figura 4.2).

De acuerdo a la clasificación que hacen Rogers *et al.*, (1998), para los usos industriales y agrícolas, el valor para los usuarios es al menos tan grande como el valor marginal del producto. Para el uso doméstico, la disposición de pago por el agua representa un límite inferior de su valor, ya que hay un valor adicional al agua. En muchos sistemas de explotación, los retornos de agua excedente suelen usarse para abastecer a poblaciones, a la industria o a la agricultura y es muy importante considerarlos para la valoración económica del recurso hídrico; por ejemplo, una parte de los retornos de agua para el riego puede recargar los acuíferos de la región y/o aumentar los retornos hasta el río o canal de aguas abajo. Sin embargo, los beneficios de los retornos dependerán, fundamentalmente, de la proporción de agua que se "pierde" por la evaporación (debido a los drenajes abiertos y canales) o por otros "sumideros" existentes. Los beneficios indirectos por el uso del agua se producen con los sistemas de riego que abastecen del recurso a las poblaciones (consumo e higiene personal) y a la ganadería, lo cual puede resultar en una mejoría en la salud o contar con mayores ingresos para la población rural pobre. Los objetivos sociales no son directamente cuantificables tales como: reducción de la pobreza, empleo y seguridad alimentaria (sobre todo en las zonas rurales, donde los precios de cereales de consumo humano tienden a ser altos en ausencia de la producción de alimentos adicionales adquirida con la agricultura de regadío, y donde también se dificulta el suministro de cereales importados). El valor económico del agua para un uso específico se representa mediante una curva o función de demanda en la que se relacionan la cantidad de agua utilizada y los precios por el uso de la misma. Lo anterior equivale al valor marginal del agua para diferentes niveles de suministro del recurso.

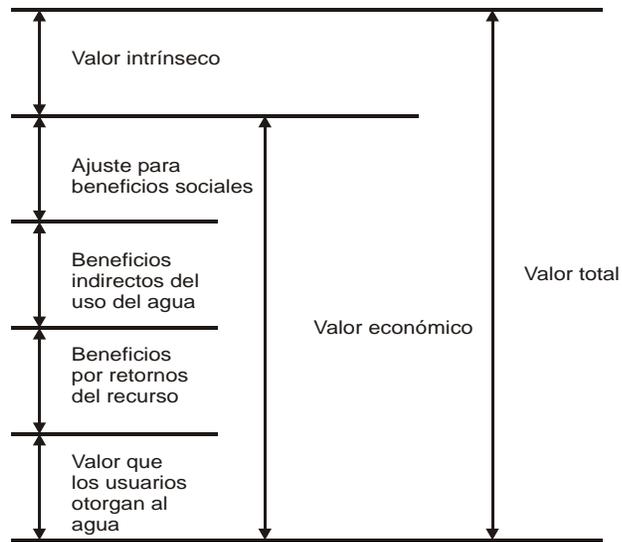


Figura 4.2 Valor de los servicios del agua(Fuente: adaptado de Rogers *et al.*, 1998)

## 5 Aspectos generales de la zona de estudio

En este apartado se presenta la caracterización del DR 023, la ubicación geográfica, la hidrología y las corrientes principales que lo conforman, el tipo de clima, la vegetación y el uso de suelo, sus obras hidráulicas principales y los cultivos que produce.

### 5.1 Caracterización de la zona de estudio: Distrito 023, San Juan del Río, Querétaro



**Figura. 5.1** Localización de la zona de estudio: Distrito de Riego 023, San Juan del Río.

El DR 023 se localiza en el estado de Querétaro, en una posición geográfica de  $20^{\circ}18'$  y  $20^{\circ}34'$  de latitud,  $99^{\circ}56'$  y  $100^{\circ}12'$  de longitud a una altura de 1,892 M.S.N.M., pertenece a los municipios de San Juan del Río y Pedro Escobedo (Figura 5.1).

### 5.1.1 Hidrología

Desde el punto de vista superficial, el Valle de San Juan del Río pertenece a la Región Hidrológica N° 26, cuenca Pánuco, Subcuenca del Río San Juan donde la corriente superficial más significativa es el Río San Juan el cual pasa por la población San Juan del Río y posteriormente por Tequisquiapan, para después servir de límite estatal entre Querétaro e Hidalgo antes de descargar en el río Moctezuma, a su vez tributario del Pánuco, que finalmente desemboca en el Golfo de México (Figura 5.2).

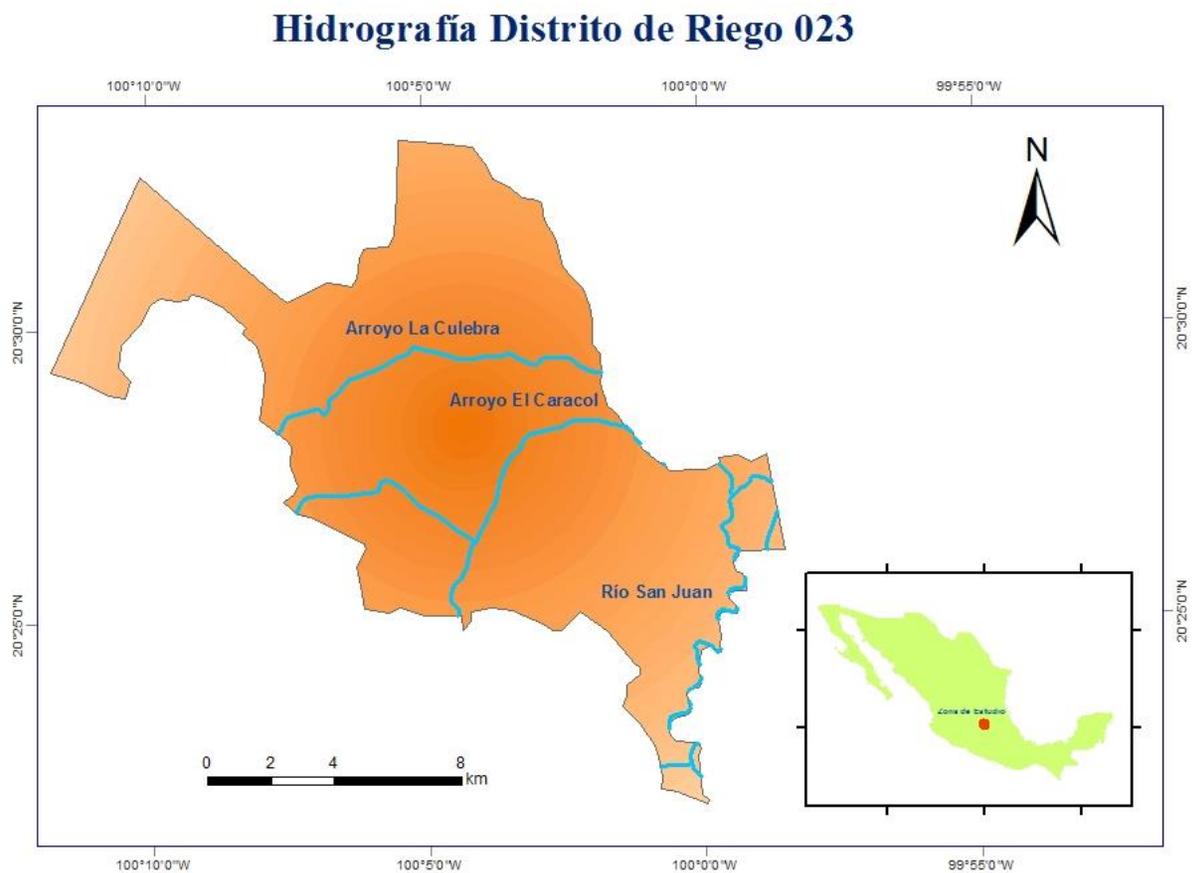


Figura 5.2 Hidrografía más importante del Distrito de Riego 023

Hidrológicamente, en el Distrito de Riego 023 convergen la Región Hidrológica Administrativa (RHA) “Pánuco” y la “Lerma-Santiago”, drenando un 84% de aguas superficiales al Golfo de México y 16% al Océano Pacífico (Figura 5.3).

## Regiones Hidrológicas Distrito de Riego 023

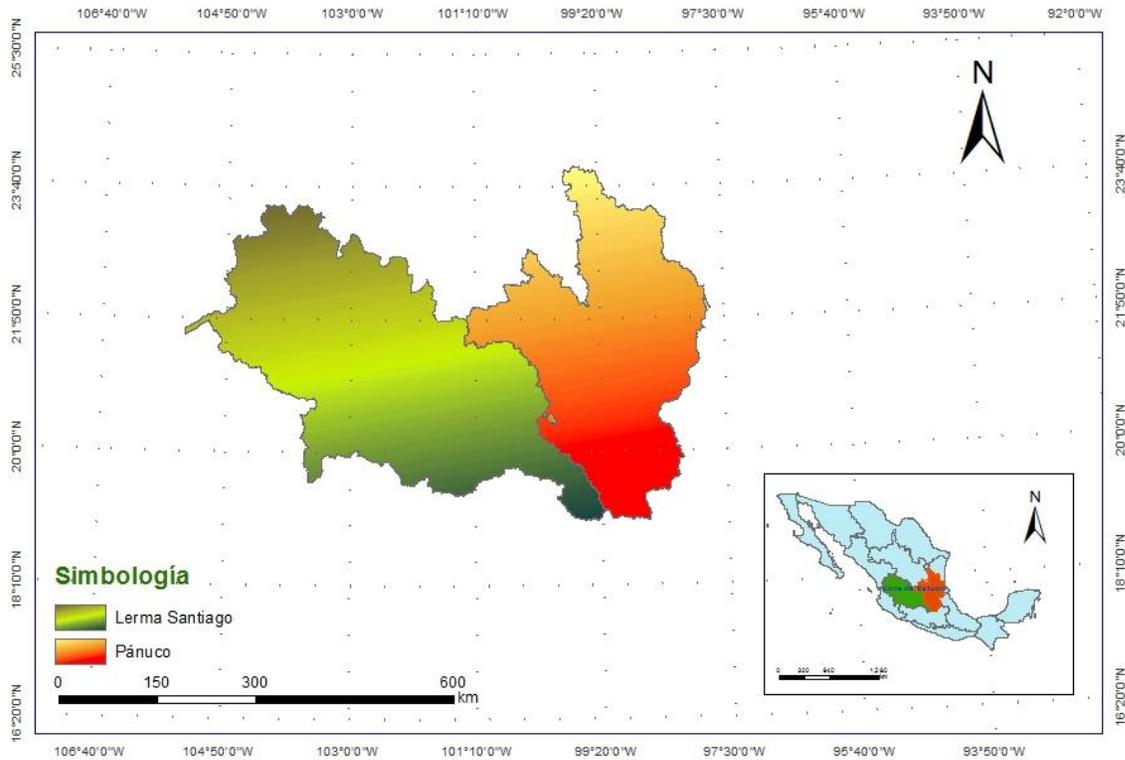


Figura 5.3 Regiones Hidrológicas del Distrito de Riego 023

La Tabla 5.1 muestra la precipitación que ocurre durante todo el año en las distintas RHA, siendo que más del 50% de la precipitación normal mensual en la mayor parte del país ocurre durante los meses de junio y septiembre; en Baja California se presenta durante el invierno.

Tabla 5.1 Precipitación normal mensual por RHA de 1971 al 2000. Conagua 2010.

Precipitación pluvial normal mensual por RHA, 1971-2000 (milímetros)												
RHA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
I Península de Baja California	23	22	17	4	1	1	9	23	24	12	12	21
II Noroeste	25	23	13	5	5	18	111	107	56	28	20	33
III Pacífico Norte	27	12	5	5	8	62	188	193	136	54	29	28
IV Balsas	15	5	6	14	52	186	198	192	189	83	16	7
V Pacífico Sur	9	8	8	20	78	244	205	225	249	111	21	9
VI Río Bravo	16	12	10	16	31	50	75	81	81	36	15	17
VII Cuencas Centrales del Norte	16	6	5	12	27	59	87	86	72	32	13	15
<b>VIII Lerma-Santiago-Pacífico</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>23</b>	<b>131</b>	<b>201</b>	<b>185</b>	<b>150</b>	<b>59</b>	<b>18</b>	<b>12</b>
IX Golfo Norte	27	17	21	40	76	142	145	130	176	82	30	29
X Golfo Centro	45	34	30	41	85	226	255	253	281	161	88	61
XI Frontera Sur	60	52	38	52	135	278	219	266	332	222	114	77
XII Península de Yucatán	48	31	29	38	83	172	158	173	212	147	76	52
XIII Aguas del Valle de México	10	8	13	28	56	105	115	104	98	50	13	7

### **5.1.2 Clima**

El tipo de clima presenta dos distintos tipos: seco y semiseco del centro, y templado subhúmedo del sur, con temperaturas de 12° a 18° C. Las condiciones de humedad aumentan en la zona sur, su precipitación anual oscila entre 630 y 860 mm.

### **5.1.3 Vegetación**

El tipo de vegetación que predomina en todo el DR 023 es pastizal inducido y matorral crasicaule. Los cultivos más representativos son los del ciclo otoño-invierno: cebada, avena, cebolla, ajo, lenteja, zanahoria y lechuga; los de ciclo primavera-verano: maíz, sorgo, frijol, chile, jitomate, brócoli, lechuga, calabaza, pepino, y algunas hortalizas. Los cultivos perennes son: alfalfa, rosas, vid y durazno (Figura 5.4)

### **5.1.4 Suelo y usos**

Los suelos están clasificados como facozems, vertisoles y litosoles, de origen residual, aluvial y coluvial, tienen como material de origen rocas riolíticas, tobas, andesitas, basaltos y areniscas, son suelos profundos arcillosos producto de la sedimentación de los materiales volcánicos en un medio lacustre. Las condiciones topográficas son de pendientes suaves de 3 a 5%, en el sur, muy cerca de la presa Constitución de 1917 se presentan desniveles de 5 a 10% como máximo. Como se indica (Figura 5.4) el uso de suelo principal que se le da en la zona que corresponde a San Juan del Río y sus alrededores es para agricultura de riego y de temporal.

## Vegetación y Uso de Suelo Distrito de Riego 023

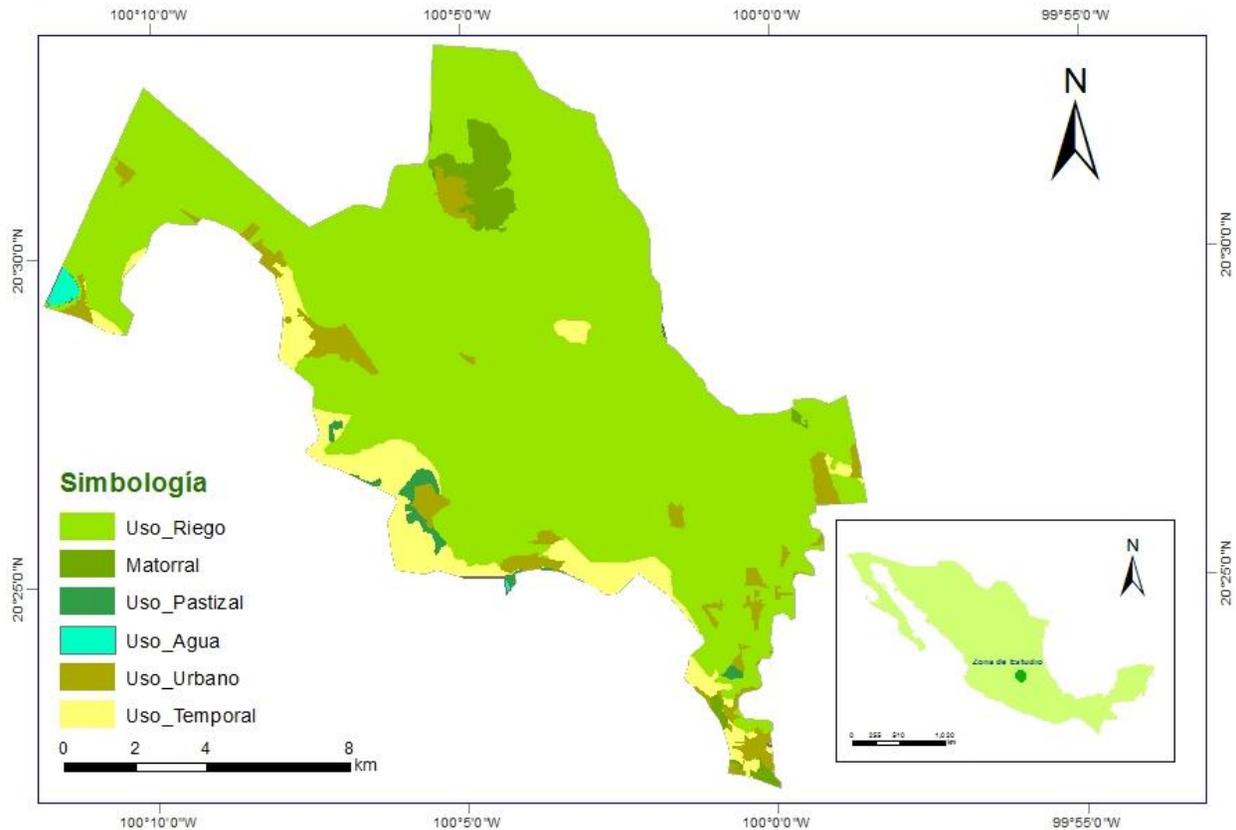


Figura 5.4 Uso de suelo y vegetación del Distrito de Riego 023

### 5.1.5 Acuífero

El acuífero de San Juan del Río es el de mayor extensión en el Estado y se encuentra hidráulicamente conectado con el de Tequisquiapan al oriente, y con el de Querétaro al poniente. La disponibilidad media de agua subterránea en esta unidad hidrogeológica es de  $38 \text{ mm}^3/\text{año}$ , sin embargo el crecimiento acelerado de la población, el desarrollo industrial, el aumento de servicios y la actividad agrícola, han provocado una competencia en el uso del recurso agua subterránea, que ha ocasionado el abatimiento y sobreexplotación en dicho acuífero (Figura 5.5).

## Acuífero Distrito de Riego 023

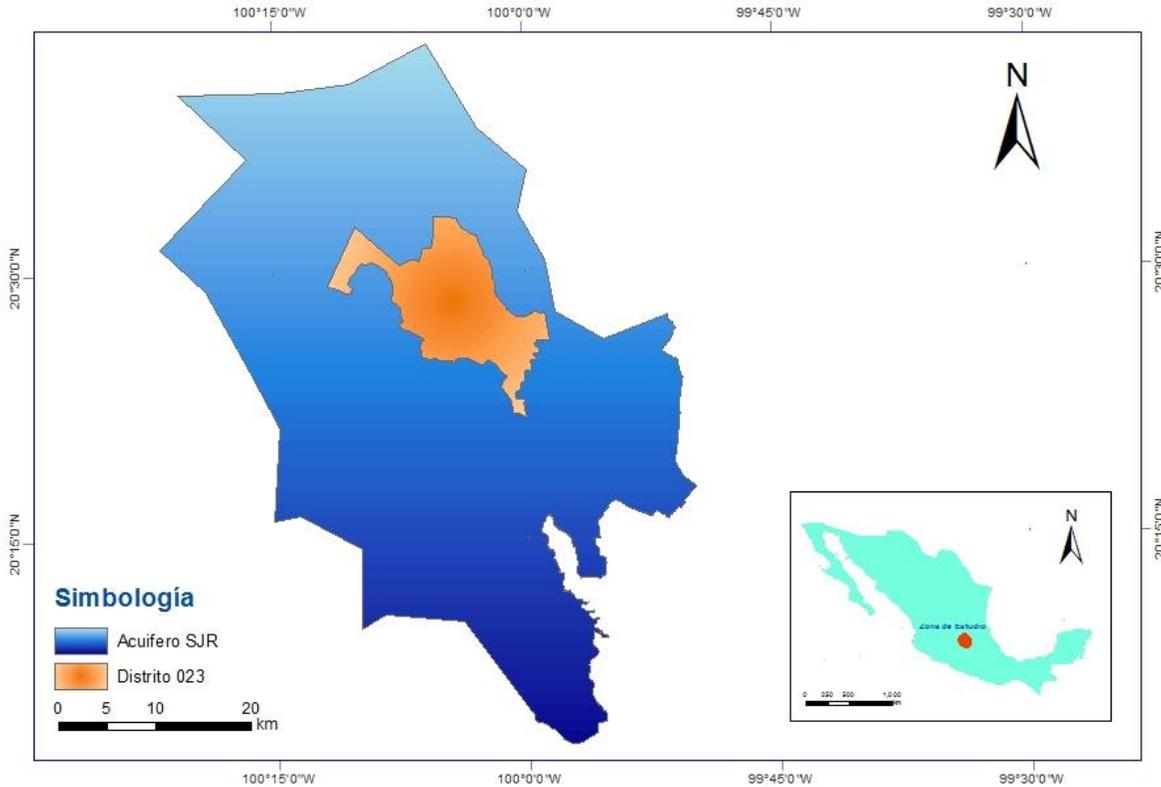


Figura 5.5. Localización del acuífero del Distrito de Riego 023

### 5.1.6 Obras Hidráulicas

Las obras hidráulicas que corresponden al Distrito de Riego 023 están indicadas en la Tabla 5.2. Se observa que las principales obras son La Constitución de 1917 y San Ildefonso, con capacidades de 69.862 y 62.700 millones de metros cúbicos respectivamente. El bordo La Venta y la presa La Llave con menor capacidad de almacenamiento que las mencionadas anteriormente, funcionan principalmente para retener excedentes de la presa Constitución de 1917, en situaciones de eventos extremos evitando desbordes y utilizar el recurso cuando se requiera. En la Tabla 5.3 y 5.4 se puede observar las características físicas e hidráulicas de dichas presas.

Tabla 5.2. Almacenamientos hidráulicos pertenecientes al DR 023

Presa ID	NOMBRE OFICIAL	SOBRENOMBRE	MUNICIPIO	CORRIENTE	REGIÓN HIDROLÓGICA	LATITUD	LONGITUD	AÑO TERMINACIÓN	CAPACIDAD AL NAMO	CAPACIDAD AL NAME	ALTURA MAXIMA	USO ACTUAL DE LA PRESA
2886	Constitución de 1917	Constitución de 1917	San Juan del Río	A. El Caracol	No. 26 Río Pánuco	20°25'08"	100°04'53"	1969	69.862	75.500	35.00	Riego en Distrito 023 San Juan del Río
2903	La Llave	Divino Redentor	San Juan del Río	A. El Caracol	No. 26 Río Pánuco	20°27'45"	99°59'43"	1885	9.300	11.600	5.00	Riego en Distrito 023 San Juan del Río
2931	San Ildefonso	San Ildefonso	Amealco	R. Prieto	No. 26 Río Pánuco	20°11'54"	99°57'43"	1973	52.745	62.700	62.70	Riego en Distrito 023 San Juan del Río
2954	La Venta	La Venta	Pedro Escobedo	A. El Hondon	No. 26 Río Pánuco	20°29'32"	100°11'18"	1971	2.340	3.850	6.20	Riego en Distrito 023 San Juan del Río

Tabla. 5.3 Características de los Drenes y Canales importantes

Canal	Desarrollo	Longitud	Gasto de Diseño
Canal Principal Constitución de 1917	Presa Constitución de 1917 a bordo La Venta	23.9 km	10 m <sup>3</sup> /s
Canal Principal Lomo de Toro	Presa Lomo de Toro a Dren Caracol	8.6 km	20 m <sup>3</sup> /s
Canal Alimentador Constitución de 1857	Derivadora Constitución de 1857 a Presa Constitución de 1857	14.3 km	25 m <sup>3</sup> /s
Dren	Desarrollo	Longitud	Gasto de Diseño
Dren Caracol	Presa Constitución de 1857 a Presa La Llave	8.6 km	200 m <sup>3</sup> /s
Dren Culebra	Bordo La Venta a Río San Juan	28.8 km	110 m <sup>3</sup> /s

El Distrito de Riego 023 cuenta con un acueducto subterráneo, 23 acueductos superficiales, 40 bordos, 33 canales, 142 corrientes intermitentes, 8 corrientes perennes y 5 presas en operación. Sin embargo, la oferta de agua es principalmente subterránea del acuífero San Juan del Río, que tiene una extensión de 2264.48 km<sup>2</sup>, y abarca parte de los municipios de San Juan del Río, Tequisquiapan, Colón, Pedro Escobedo, Huimilpan, Amealco y El Marqués. En la (Figura 5.6) se puede observar los canales principales que alimentan a cada uno de los ejidos agrícolas y que conforman los dos módulos principales del DR 023 y en la Tabla 5.4 las características hidráulicas correspondientes.

Tabla 5.4 Características hidráulicas de las presas

Características	San Ildefonso	La Llave	Constitución de 1917	La Venta
Corriente Principal	Río Prieto	Dren Caracol y Culebra	Río Galindo y Río la "H"	Arroyo El Potrerillo
<b>CUENCA</b>	Alto Pánuco	Alto Pánuco	Alto Pánuco	Alto Pánuco
Área	532.00 km <sup>2</sup>		428.00 km <sup>2</sup>	13.80 km <sup>2</sup>
Escurrimiento Media Anual	40, 639 mm <sup>3</sup>		28, 603 mm <sup>3</sup>	
Gasto Máximo Registrado	425 m <sup>3</sup> /s. Año 1937		343 m <sup>3</sup> /s. Año 1958	
Gasto Máximo Probable	1000 m <sup>3</sup> /s		1000 m <sup>3</sup> /s	
<b>PRESA</b>				
Tipo	Flexible	Rígido	Flexible	Flexible
Altura	64.30 m	3.60 m.	28.00 m.	4.30 m.
Longitud Corona	260.00 m	320.00 m.	2,600 m.	1,908.30 m.
<b>VASO</b>				
Capacidad útil	49' 202,000 m <sup>3</sup>	7' 908,000 m <sup>3</sup>	66' 562,000 m <sup>3</sup>	
Capacidad de Azolves	3' 543,000 m <sup>3</sup>	1' 404,000 m <sup>3</sup>	3' 300,000 m <sup>3</sup>	
Capacidad de Control de Avenidas	795 m <sup>3</sup> /s	118.70 m <sup>3</sup> /s	982.00 m <sup>3</sup> /s	

El Distrito de Riego 023 (Figura 5.6) se encuentra dividido en tres Módulos de riego: Módulo I, Módulo II y Módulo III, al primer módulo le provee agua la presa San Ildefonso por medio del Canal Principal Lomo de Toro y sus canales laterales a cada una de las tomas. El segundo módulo se abastece mediante la presa Constitución de 1917 por medio del Canal Principal y los laterales, el tercer módulo se sirve del bordo La Venta cuando este tiene agua, pero mayormente por medio de extracción de 4 pozos de usuarios particulares. La Presa Constitución 1917 controla las aportaciones de los ríos Galindo y La H, para el riego de 5500 ha del Módulo I, en tanto que la presa San Ildefonso controla y almacena escurrimientos del río Prieto para el riego de 4500 ha del Módulo II; vasos y bordos auxiliares sirven aproximadamente a 3536 ha que forman el Módulo III, con un total de 13,536 ha de riego.

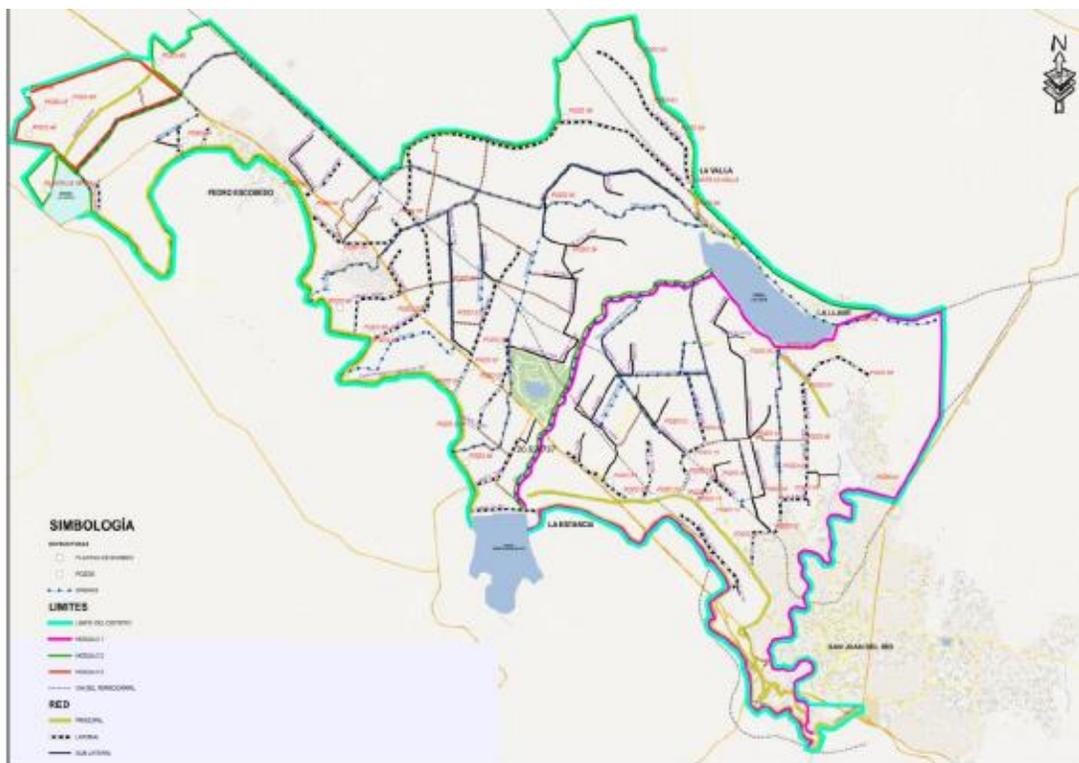


Fig. 5.6 Distrito de Riego 023, San Juan del Río

## 5.2 Cultivos

Para utilizar el recurso es necesario elaborar un Plan de riego para el año agrícola y de esta manera administrar el agua. Esto se hace mediante una asociación de usuarios, los cuales presentan su propuesta de Plan de Riego de acuerdo a sus necesidades. El año agrícola comienza el 1° de octubre y termina el 30 de septiembre, y los cultivos están organizados en dos temporadas: primavera-verano y otoño-invierno, dependiendo de la propuesta que tengan se determina si el volumen es suficiente para atender todas las necesidades, sino alcanza se reducen la superficie de riego hasta lograr un Plan factible a desarrollar. Actualmente se está promoviendo un sistema de riego por goteo (tecnificado), pero tiene el inconveniente que los usuarios necesitan capacitación para poder utilizarlo. En las Tabla 5.5 se indica el tipo de cultivo para cada uno de los Módulos que conforman el Distrito de Riego 023 por temporada.

Tabla 5.5 Cultivos de riego agrícola del Distrito de Riego para el Módulo I y Módulo II

Módulo I		Módulo II	
Cultivo		Cultivo	
Otoño-Invierno	Primavera-Verano	Otoño-Invierno	Primavera-Verano
Avena	Frijol	Avena	Frijol
Cebada	Chile	Cebada	Chile
Varios	Maiz	Trigo	Maiz
	Sorgo	Hortalizas	Sorgo
	Varios	Varios	
Perennes		Perennes	
Alfalfa	Otros frutales	Alfalfa	
Vid	Rosal	Rosal	
Frutales			

## **6 Descripción de la metodología.**

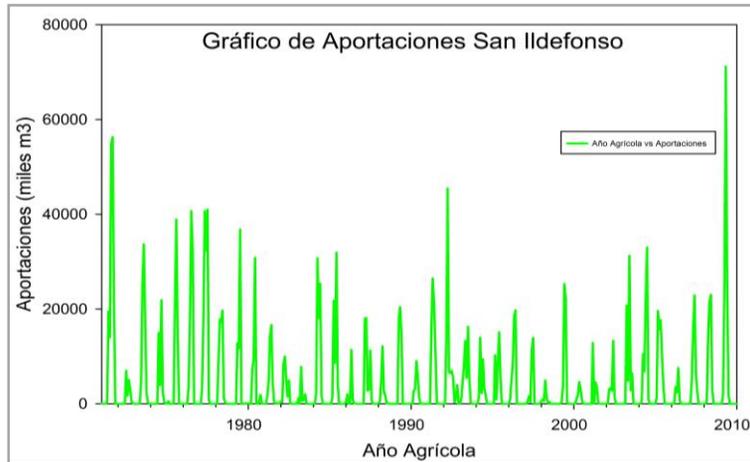
Se obtuvo la información de las características de las presas y conducciones referentes al Distrito de Riego 023 por medio de datos proporcionados por la CONAGUA (Tabla 5.2 y 5.3), siendo las principales San Ildefonso y la Constitución de 1917; La Venta y La Llave carecen de información completa, y no cuentan con estaciones meteorológicas o aforos en los canales se puedan proporcionar los datos necesarios para el análisis en el esquema, además que sirven principalmente para casos de almacenamiento en eventos extremos o para dotar de agua pequeñas zonas de parcelas, volúmenes mínimos que no son a consideración en el análisis.

El DR 023 está conformado con más de 527 tomas que son las que satisfacen las demandas de los regantes. Para simplificar el esquema y éste pueda trabajar de forma óptima, debido a que los volúmenes por demanda resultaron muy pequeños para las unidades que admite AquaTOOL ( $\text{Hm}^3$ ), se trabajó el Distrito en 2 módulos, los cuales ya están establecidos por las mismas políticas internas: el Módulo I depende de la recepción aguas arriba de la presa San Ildefonso, el Modulo II recibe los recursos de San Ildefonso y de la presa Constitución. El esquema SIMGES admite hasta 200 unidades de demanda.

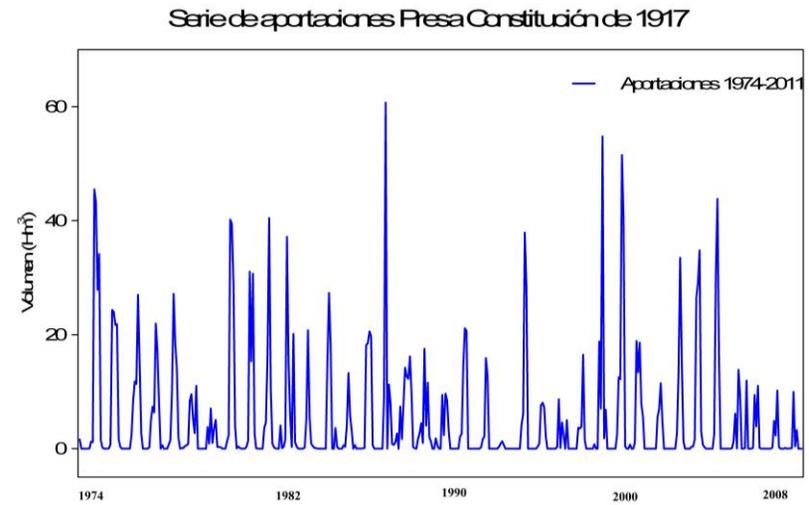
### **6.1 Análisis de la información**

La información para las presas San Ildefonso y Constitución de 1917 incluyó los datos de evaporación, infiltración, precipitación, derrames y extracciones para las series históricas de 1970-2011. En la Figuras 6.2 a y b se observa la variación de las aportaciones a la presa San Ildefonso a lo largo de 40 años, siendo en 1970, 1993 y 2008 los periodos con mayor volumen que llegó a la presa por medio de la cuenca y de otros ríos, superando los  $70 \text{ Hm}^3$  en el 2008, debido a un evento extremo ocurrido en el que la presas llegó a su capacidad máxima. Las aportaciones que recibe la presa Constitución de 1917 presentan un comportamiento similar a las aportaciones de la presa San Ildefonso, esto debido que parte del agua que se almacena proviene de la presa San Ildefonso (Figura 6.3 b). Para ambas presas la información que se utilizó para obtener el volumen total de las aportaciones mensuales provino de los aforos diarios a los ríos, las láminas de precipitación y las entradas por la cuenca.

Las extracciones para cada presa no muestran la similitud tan marcada en cuanto a volumen extraído por año, se observa (Figuras 6.2 a y b) que para la presa San Ildefonso los volúmenes llegan a sobrepasar los 18 Hm<sup>3</sup> para el año de 1981 y el promedio de las extracciones se está entre 4 y 5 Hm<sup>3</sup>, mientras que para la Constitución de 1917 el máximo estuvo en 8 Hm<sup>3</sup> y en promedio las extracciones en 3.5 Hm<sup>3</sup>.

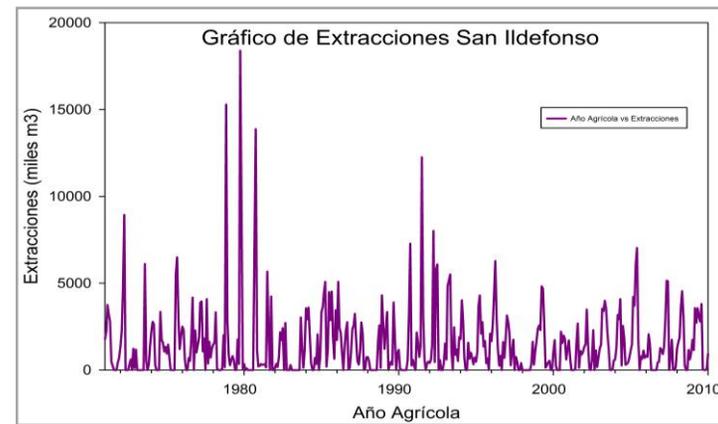


a)



b)

Figura 6.2. Serie histórica de volumen de agua que entra a las presas San Ildefonso y Constitución de 1917.



a)

b)

Figura 6.3 Serie histórica de extracciones de las presas San Ildefonso y Constitución de 1917

## 6.2 Unidades de demanda agrícola

Como se ha descrito anteriormente en el capítulo anterior, el Distrito de Riego 023 está conformado por tres Módulos o Unidades de Demanda Agrícola: el Módulo I, el Módulo II y el Módulo III, este último no formará parte del análisis, debido a que se tiene información que la mayor parte de las temporadas la zona es regada por medio de pozos particulares y únicamente se utiliza agua del bordo La Venta (que mayormente se encuentra en su mínima capacidad) cuando ocurren eventos extremos y la presa Constitución de 1917 llega a su máxima capacidad envían agua al bordo por medio del Canal Principal Constitución de 1917.

Para cada año previo se realiza un Plan de Riego Anual para el Distrito, que como se menciona anteriormente, por un lado el Comité de ejidatarios hace una solicitud del volumen que necesitarán para regar en toda la temporada, y es la información que toman como base para analizar entre el personal técnico el volumen que otorgarán, en base a los pronósticos del agua y de un balance hídrico a futuro (es la información que otorgada por el DR 023. Se tiene desconocimiento preciso del motivo del cambio de volumen año con año de las demandas agrícolas, podría deberse a cambios de tipo de cultivo o cambios en la superficie regada, ya que si fuese el mismo tipo de cultivo y la misma superficie no debería de variar la demanda como se observa en la Figura 6.5. La Tabla 6.2 muestra la variación en el almacenamiento mes a mes para el periodo 2011-2012, se observa que el volumen de entrada de agua es menor al de extracción, y en el mes de mayo la presa Constitución de 1917 que suministra agua al Módulo II se encuentra con un volumen de  $0.59 \text{ Hm}^3$ . Los meses con mayor aportación a la presa fueron de junio-agosto.

Tabla 6.2 Variación del almacenamiento de la presa Constitución de 1917.

Funcionamiento del vaso de la presa Constitución de 1917				
Año Agrícola 2011-2012	Almacenamiento inicial	Entradas	Salidas	Almacenamiento final
	Hm3			
Octubre	13.698	0.2000	0.809	13.089
Noviembre	13.089	0.0280	1.031	12.086
Diciembre	12.086	0.0165	1.932	10.171
Enero	10.171	0.0293	2.510	7.690
Febrero	7.690	0.0167	2.274	5.433
Marzo	5.433	0.0161	2.133	3.316
Abril	3.316	0.0295	2.062	1.283
Mayo	1.283	0.3050	0.998	0.590
Junio	0.590	0.8750	0.183	1.282
Julio	1.282	1.3890	0.215	2.456
Agosto	2.456	0.8040	0.265	2.995
Septiembre	2.995	0.1330	0.268	2.860

En la Tabla 6.3 se observa que los meses con menor volumen en la presa fueron de marzo-julio, a pesar que desde mayo las salidas debido a las demandas se redujeron considerablemente, pero las entradas de agua a la presa se mantuvieron bajas hasta el mes de agosto con un registro histórico de 11.51 Hm<sup>3</sup>.

Tabla 6.3 Variación del almacenamiento de la presas San Ildefonso

Funcionamiento del vaso de la presa San Ildefonso				
Año Agrícola 2011-2012	Almacenamiento inicial	Entradas	Salidas	Almacenamiento final
	Hm3			
Octubre	26.895	0.130	1.768	25.257
Noviembre	25.257	0.029	1.632	23.654
Diciembre	23.654	0.013	3.809	19.858
Enero	19.858	0.022	4.080	15.800
Febrero	15.800	0.013	4.162	11.651
Marzo	11.651	0.022	4.259	7.414
Abril	7.414	0.120	4.121	3.413
Mayo	3.413	0.580	1.371	2.622
Junio	2.622	1.755	0.655	3.722
Julio	3.722	0.465	0.706	3.481
Agosto	3.481	11.517	0.780	14.218
Septiembre	14.218	0.000	0.951	13.267

### 6.3 Demandas consuntivas

Del análisis de los datos obtenidos de las demandas consuntivas de cada módulo se realizó la sumatoria del volumen total por año y se representa en la Figura 6.4, en donde se puede observar que para los periodos agrícolas 2005-2012 los volúmenes de las demandas han cambiado año con año. El periodo con mayor extracción es el 2008-2009 llegando a 12.40 Hm<sup>3</sup> en el mes de marzo, el menor en el análisis es para el 2011-2012.

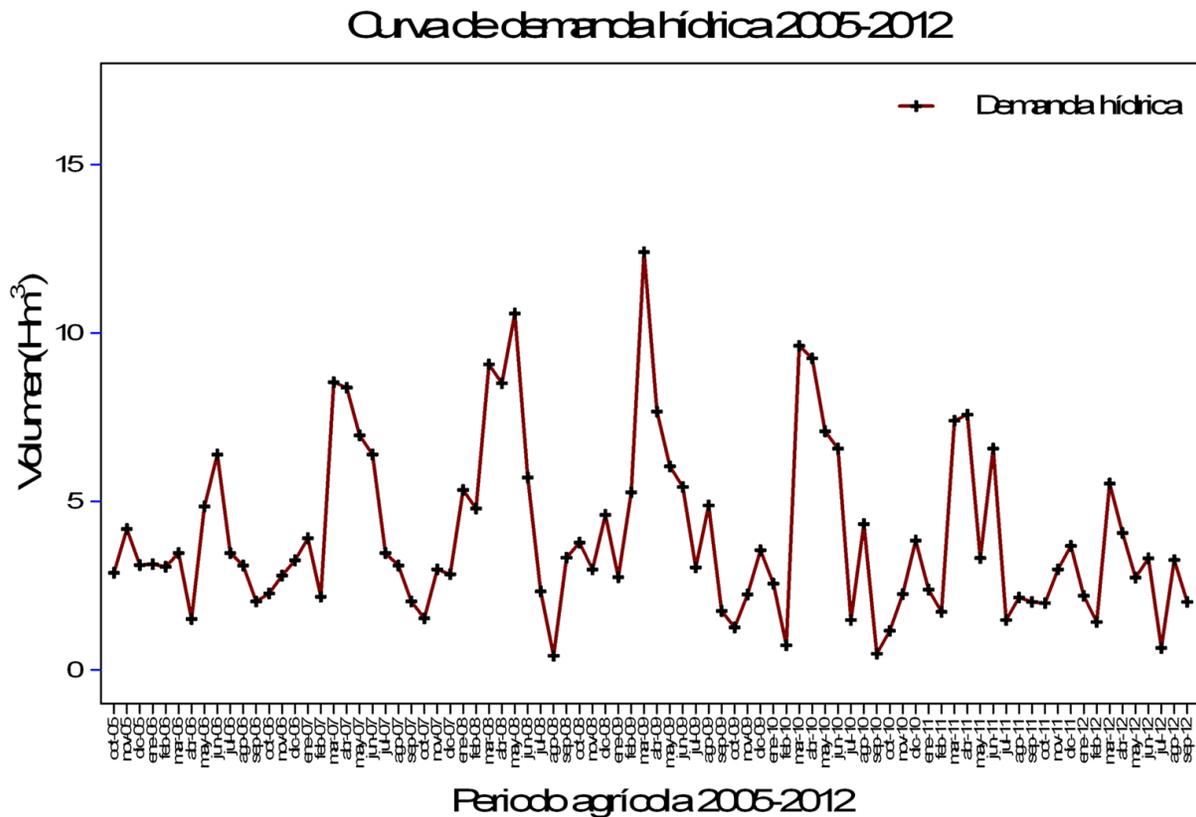


Figura 6.4. Análisis de las demandas consuntivas periodo 2005-2012

### 6.4 Elaboración del esquema

#### 6.4.1 Análisis del Sistema

Se realizó el análisis de los componentes que intervienen en el sistema: canales, presas, nudos, tomas y derivaciones. De las 3 presas y un bordo con los que cuenta el sistema, 2 son las



derivación proveniente de la presa San Ildefonso fueron para el ciclo agrícola octubre 2011-septiembre 2012 y se cargaron previamente en archivos externos independientes y las unidades en  $\text{Hm}^3$ , se consideró la evaporación en la presa. Los datos físicos de la presa fueron dados mediante las curvas de áreas-capacidades correspondiente (Figura 6.5).

#### **6.4.2 Elementos de los embalses**

Los embalses son los vasos de almacenamiento, en este caso las dos presas San Ildefonso y Constitución de 1917. Los datos de entrada que necesita cada elemento consisten en las características físicas e hidráulicas principales y sus conexiones con los demás elementos en caso de existir (Figura 6.6). Las características físicas incluyen datos de entrada de:

- Coeficientes de infiltración (en caso de existir)
- Acuífero al que pertenece
- El número de prioridad del embalse. Está dado por la importancia de almacenamiento que tenga respecto al todo el sistema, para la presa San Ildefonso se le dio el número uno y para la presa Constitución de 1917 el número dos, debido a que San Ildefonso es de mayor prioridad, ya que es la que deriva a la Constitución de 1917.
- Volumen en la presa con el que inicia el mes
- Caudal máximo de sueltas
- La columna de aportación pertenece a las entradas que llegan a la presa por medio de los canales y por cuenca propia, son datos que se encuentran en un archivo externo (txt) y son llamados desde la ficha de datos de cada uno de los dos embalses.
- Nudo de vertidos. Indicando hacia cual canal envía la presa volumen aguas abajo
- Volúmenes: máximo, objetivo y mínimo, están dados por las autoridades que regulan el funcionamiento de las presas y para cada mes es un valor distinto, dependiendo de las necesidades que se tengan.
- Las Cotas con los valores de áreas-capacidades de las presas.
- La Tasa de Evaporación media mes a mes.

El fichero al cual refiere cada una de la presas funciona internamente mediante la

expresión 1) mencionada en el apartado 3.3

$$T_E = \sum_{i=1}^{nemb} \left( \left( \sum_{j=1}^4 V_{ij} C E_{ij} \right) + P_i C V \right) \quad (2)$$

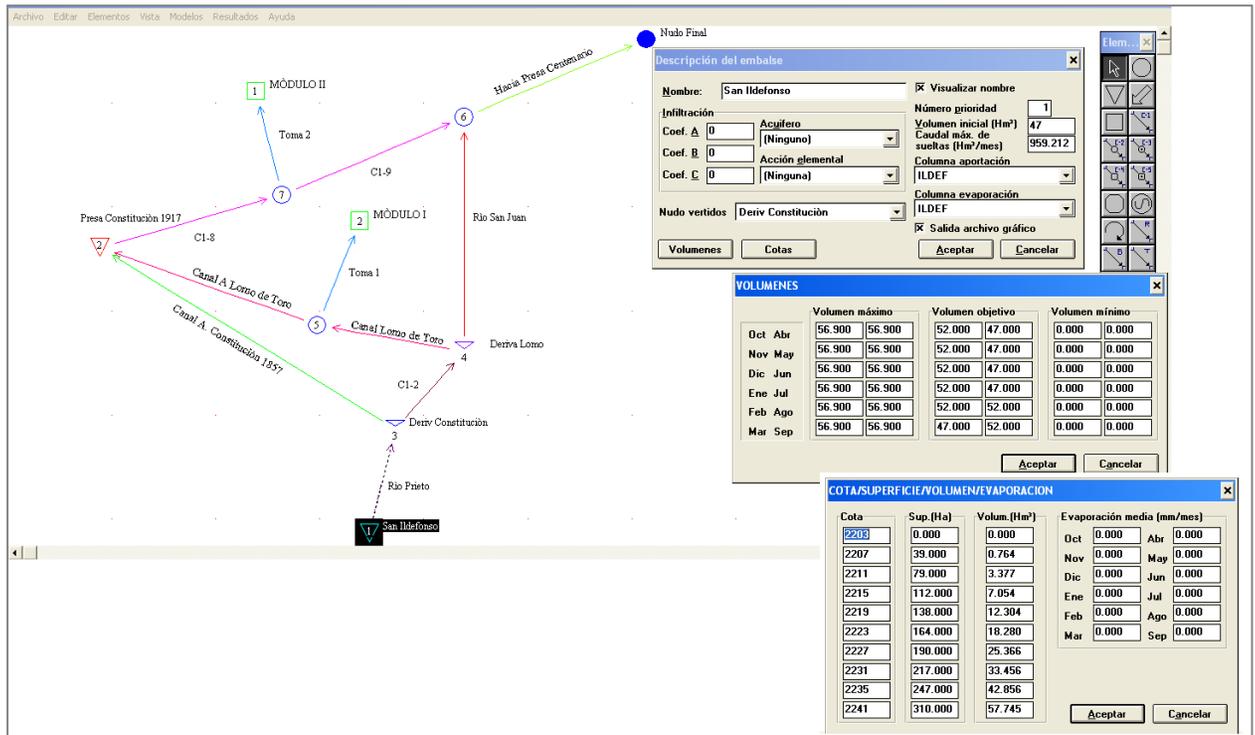


Figura 6.6 Elementos internos que conforman el esquema de la red de flujo.

### 6.4.3 Las Demandas en los módulos

- La demanda. Para cada módulo considera un volumen mensual bruta, está dada en unidades de Hm³. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron las demandas para cada año correspondiente en cada una de las corridas que se realizaron en las simulaciones, como se verá más adelante.
- Acuífero al que recarga. En el caso de tener infiltraciones profundas del agua que no se consuma en la demanda.
- Acuífero del que se bombea.
- Caudal máximo de bombeo, que limita la capacidad de extracción mensual.

Las demandas consuntivas son evaluadas mediante la siguiente expresión:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left( D_i CK + \sum_{t=1}^{nto} (S_{ti}(CT_{ti} + 1) - DS_{ti}CT_i) \right) \quad (6)$$

#### 6.4.4 Las Tomas

La Toma es el elemento que abastece de agua a la demanda, para cada toma se utilizaron entradas mensuales de agua el cual dependió del valor de la demanda en cada mes. Algunas restricciones consistieron en

- Dotación anual. En el que se le dio un valor máximo anual permitido, es decir, el total de los doce meses de la demanda.
- N° de prioridad que estableció la importancia cuando se tienen varias tomas y tipos de cultivos que requieren prioridad en el suministro. Cada módulo estuvo compuesto por una toma, entonces el número de prioridad fue uno.
- Coeficiente de Retorno. El valor puede oscilar entre 0 y 1, se estableció como “ninguno” ya que se nos indicó que el agua que llega a las demandas no tiene excedentes que puedan infiltrar al subsuelo.

#### 6.4.5 Las Conducciones y derivaciones

Las conexiones de las presas con los módulos se hicieron a través de canales tipo 1, estos tipos de canales carecen de algún tipo de característica específica o especial (por la información que se obtuvo). La presa San Ildefonso se conectó aguas abajo a través del Río Prieto hasta llegar a la Derivadora Constitución de 1817 donde se representó una derivación hacia la Presa Constitución mediante el Canal Alimentador Constitución de 1817 y otra hacia la Derivadora Lomo de Toro. De la Derivadora Lomo de Toro se deriva hacia el Río San Juan hasta llegar al nudo final, donde vierte aguas abajo hacia la Presa El Centenario (no forma parte del sistema). La otra derivación, Lomo de Toro se realizó mediante el canal con el mismo nombre el cual alimenta la demanda al Módulo I por medio de la Toma 1 la cual representa a más de 200 tomas que llegan a

las parcelas.

Los datos de entrada al fichero incluyen caudales mínimos mensuales que para el análisis estuvieron dados por un caudal mínimo de 0 Hm<sup>3</sup>/mes, ya que si en algún momento dado no existiera volumen que pueda circular por el canal tendría que quedarse sin agua. El volumen máximo se rigió por las características hidráulicas de cada uno de los canales, el reglamento de operación proporcionado nos indicó el caudal máximo a circular por cada temporada (primavera-verano y otoño-invierno). El número de prioridad es uno para el Canal Alimentador Constitución 1857 y el Canal Lomo de Toro, el primero porque transporta agua hacia la presa Constitución de 1917 que alimenta al Módulo II el cual tiene prioridad uno, y el Canal Lomo de Toro debido a que es más primordial que el agua llegue al nodo 5 para mandarla al Módulo I con mayor prioridad que el nodo 6, el cual manda los excesos de agua al nodo 6 para después sacarlos al sistema hacia el nodo final. La prioridad dos para el canal C-1 2 y el Río San Juan.

Los recursos que llegan a la presa se dividen en gran parte para el Módulo II aguas abajo mediante el canal C1-8 hasta el nodo 7 donde una parte del agua es utilizada para abastecer mediante la Toma 2 que representa todas las tomas hasta llegar a las parcelas. El agua que sobrara o en un momento dado pudiera ser desalojada de la presa Constitución de 1917 mediante el Dren El Caracol y el Dren Culebra hacia la presa la Llave, la cual sirve para almacenar agua del sistema para abastecer una pequeña zona, por la magnitud del consumo no fue considerada parte del sistema, por lo tanto el agua se canaliza a la presa Centenario, aguas abajo.

Para los tramos de río y canales tipo 1 se utiliza la ecuación:

$$T_{R1} = \sum_{i=1}^{ntr1} (D_i C D_i + (Q_i - Q_i^{min}) * C Q_i) \quad (4)$$

Finalmente mediante un balance de masas se obtiene el volumen final para cada embalse, y está dado por :

$$V_f = V_i + A_e + A_a - P_f - E - S_c - S_v \quad (10)$$

## 6.5 Las Simulaciones

Para las simulaciones se tomaron datos de Aportaciones y Evaporaciones del año 2005-2011, en archivos .txt independientes para posteriormente puedan ser leídos desde el SIMGES. Cada archivo contiene información de la simulación, el nombre del archivo de datos y el número de embalses que consta el archivo. En la primera columna el “AÑO”, la segunda columna el “MES” en el cual los datos son el número de mes comenzando en octubre hasta septiembre y se repite hasta llegar al año 2011. La tercera y cuarta columna son para las presas “ILDEFONSO” y “CONSTITUCIÓN 1917”, con los valores de las evaporaciones o las aportaciones, según sea el caso.

Se realizaron las simulaciones de la gestión del DR 023 para el periodo del 2005 al 2011 y para cada uno de los periodos agrícolas 2005-2011 con los distintos volúmenes de demandas (Figura 6.4). Para todos los escenarios se utilizaron los mismos datos de entrada de la serie de “EVAPORACIONES” y “APORTACIONES” del 2005-2011. Los años a simular fueron seis.

## 6.6 Escenarios de análisis

Con el fin de hacer eficiente el Distrito de Riego 023 se analizaron los siguientes escenarios:

- 1) Reducción de las demandas para cada año en un 10%
- 2) Reducción de las demandas para cada año en un 25%
- 3) Reducción de las demandas para cada año en un 50%
- 4) Con la demanda máxima del periodo 2005-2012 suponerla constante para todos los años
- 5) Con la demanda máxima del periodo 2005-2012 reducirla al 25%

## 7 Resultados y conclusiones

### 7.1 Resultados de las simulaciones

Con las demandas 2005-2006 se corrió el modelo de simulación obteniendo los resultados descritos a continuación. En la Figura 7.1 se observa la curva de Déficit en el Módulo I y Volumen final de la presa San Ildefonso, que para el periodo diciembre 05-julio 06 existe un déficit de 2 Hm<sup>3</sup> entre diciembre 2005 y marzo 2006 llegando a un máximo de 5.4 Hm<sup>3</sup> en mayo del 2006 que coincidió con el volumen de almacenamiento mínimo de la presa que lo alimenta en ese mismo periodo. Las aportaciones percibidas en la presa San Ildefonso durante el periodo 2005-2011 se mantuvieron muy escasas durante la mayor parte de los meses alcanzando volúmenes que no sobrepasaron los 25 Hm<sup>3</sup> excepto en agosto 2008 con un evento extraordinario en donde los escurrimientos alcanzaron los 72 Hm<sup>3</sup>, Figura 7.2.

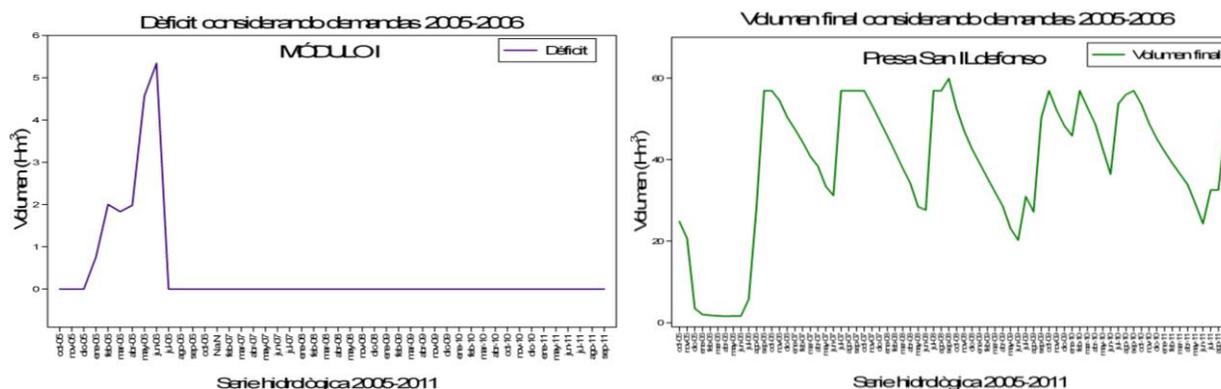


Figura 7.1. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

En el Módulo II el déficit es mínimo en el mes de junio 2006 de 0.61 Hm<sup>3</sup>, en ese mes la presa Constitución de 1917 no alcanzó a dotar la demanda de agua debido a que se encuentra al límite del volumen útil, los demás meses la presa se encontró con suficiente capacidad almacenada superior a los 40 Hm<sup>3</sup> y pudo satisfacer perfectamente las demandas (Figura 7.3). Las aportaciones considerables que llegaron a la presa fueron en septiembre 2006, agosto y septiembre 2007 y agosto 2008, siendo éste último el de mayor relevancia con un volumen de 45 Hm<sup>3</sup> (Figura 7.4.)

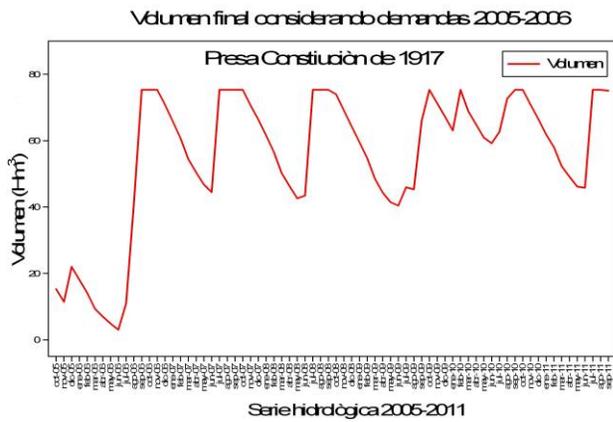


Figura 7.3. Gráfico de Déficit en el Módulo II y Volumen final en la presa Constitución de 1917

Para las demandas 2006-2007 el déficit se registró en el Módulo I en los meses de enero-junio 2006 y abril-junio 2011, de igual manera la presa no satisfizo las demandas en dichos meses (Figura 7.5.). El Módulo II no indica déficit en ningún mes.

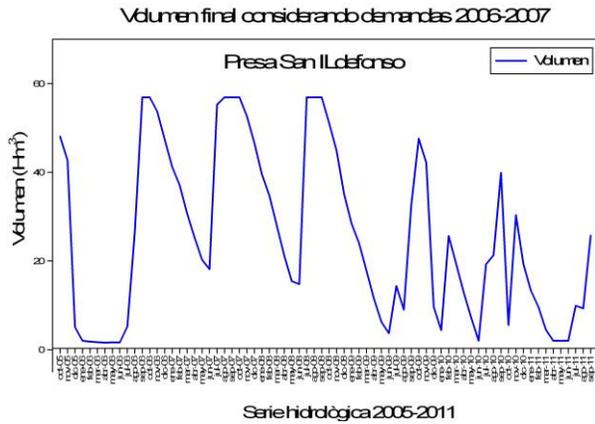


Figura 7.5. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso

En las demandas 2007-2008 existió déficit en el Módulo I en los meses de abril-junio 2006, enero 2009 y la mayor en enero-junio 2010 hasta 4.8 Hm<sup>3</sup>. El volumen final de la presa que alimenta el Módulo I mostró mucha variación en el almacenamiento, durante los meses de septiembre y octubre es cuando se tuvo el mayor volumen hasta 57 Hm<sup>3</sup> (Figura 7.6.).

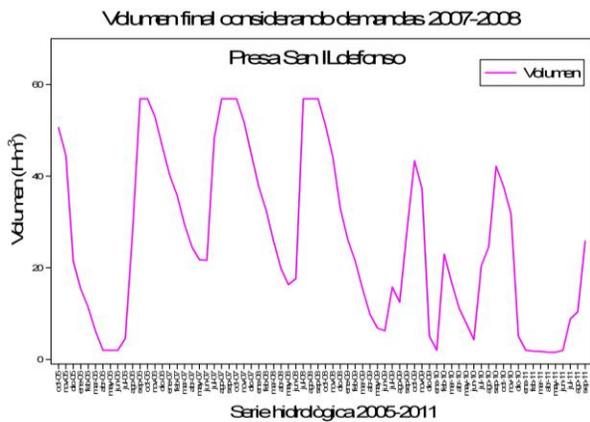


Figura 7.6. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

En la Figura 7.7 se observa el déficit existente en el Módulo I en los meses febrero-junio 2011, el almacenamiento en la presa San Ildefonso tiene periodos críticos a partir del año 2009.

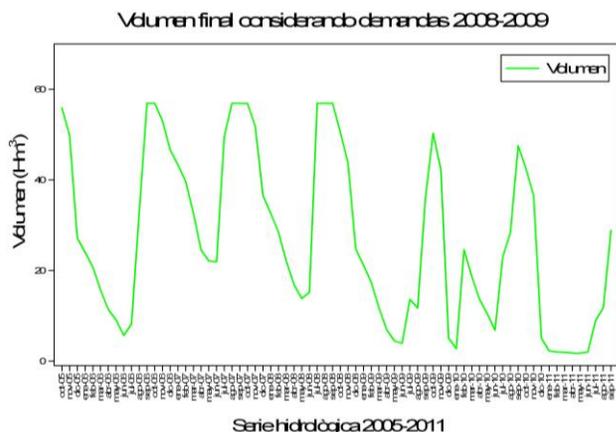


Figura 7.7. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

En la simulación realizada con las demandas 2009-2010 se encontraron déficit en los dos módulos como se observa en la figura 7.8 y 7.9. En el Módulo I el déficit ocurre en los primeros meses de año 2006 y en el Módulo II en mayo y junio 2006.

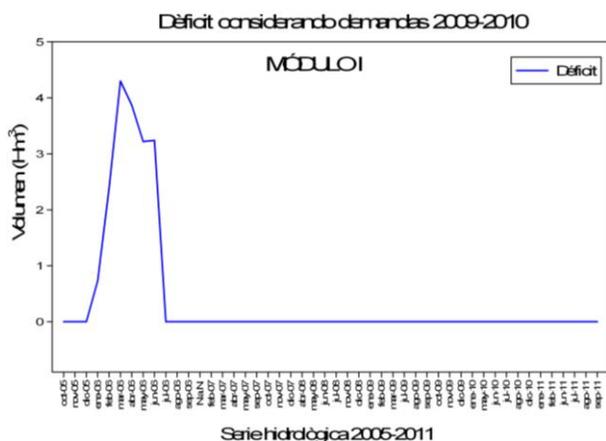


Figura 7.8. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

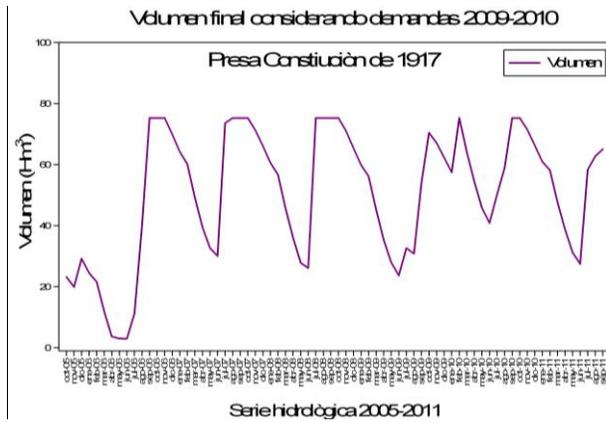


Figura 7.9. Gráfico de Déficit en el Módulo II y Volumen final en la presa Constitución de 1917.

En la simulación con las demandas 2010-2011 no existió déficit en ninguno de los dos módulos. Para las demandas 2011-2012 se observa en la Figura 7.10 el déficit en enero-junio 2006 en el Módulo I y el volumen final de la presa mes a mes, coincidiendo en los meses que menor volumen existe con la deficiencia en la demanda.

## 7.2 Los escenarios

Escenario 1: Para cada periodo de año con las demandas correspondientes se realizó la simulación disminuyendo un 10% la demanda mes con mes para cada uno de los dos módulos, con la finalidad de conocer el comportamiento y erradicar el déficit en ambos módulos. En las demandas 2005-2006 se redujo el déficit de  $5.4 \text{ Hm}^3$  a  $4.5 \text{ Hm}^3$ , pero no fue suficiente el volumen en la presa para satisfacer la demanda (Figura 7.11)

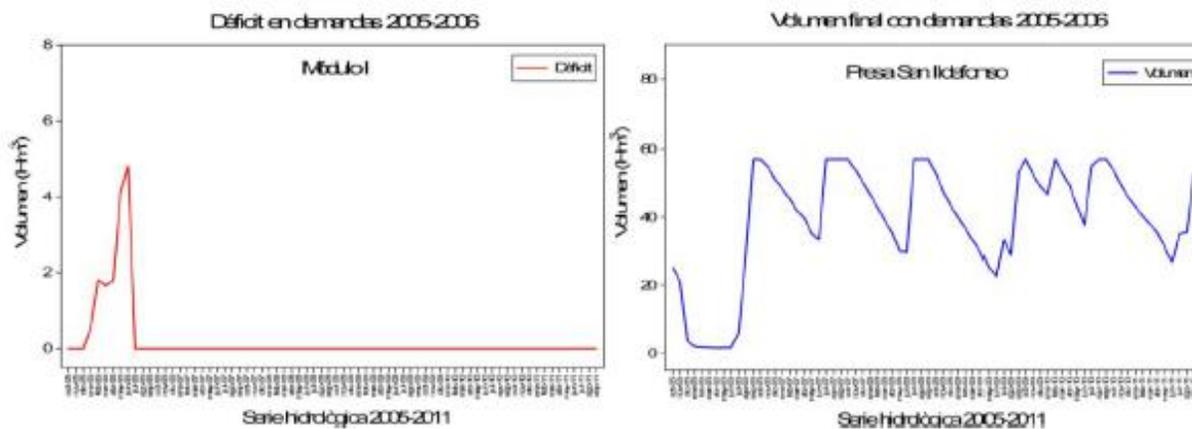


Figura 7.11. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

Las simulaciones para 2006-2007 no redujeron significativamente el problema de déficit, por lo que se revisará en el siguiente escenario si es posible mejorarlo (Figura 7.12).

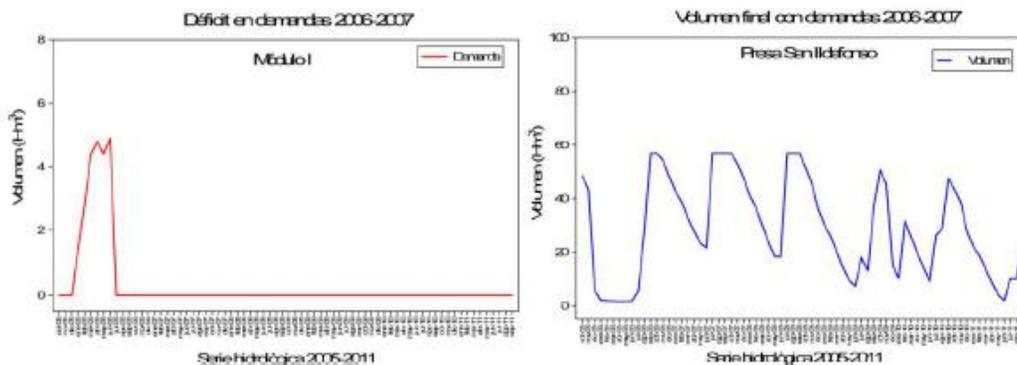


Figura 7.12. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

El escenario con la reducción en las demandas 2007-2008, el déficit es evidente en los meses de junio 2008 y julio 2011, el volumen final de la presa San Ildefonso en esos meses se ve afectado por las escasas aportaciones a la misma (Figura 7.13).

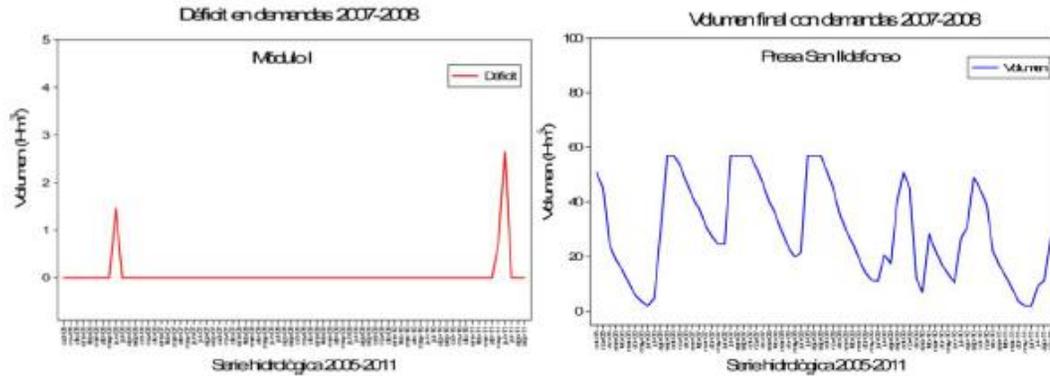


Figura 7.13. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

En 2009-2010 los módulos I y II continúan presentando déficit, como en casos anteriores, se observa que ocurre en los meses de marzo-junio 2006, tanto en el Módulo I (Figura 7.14) como en el Módulo II (Figura 7.15).

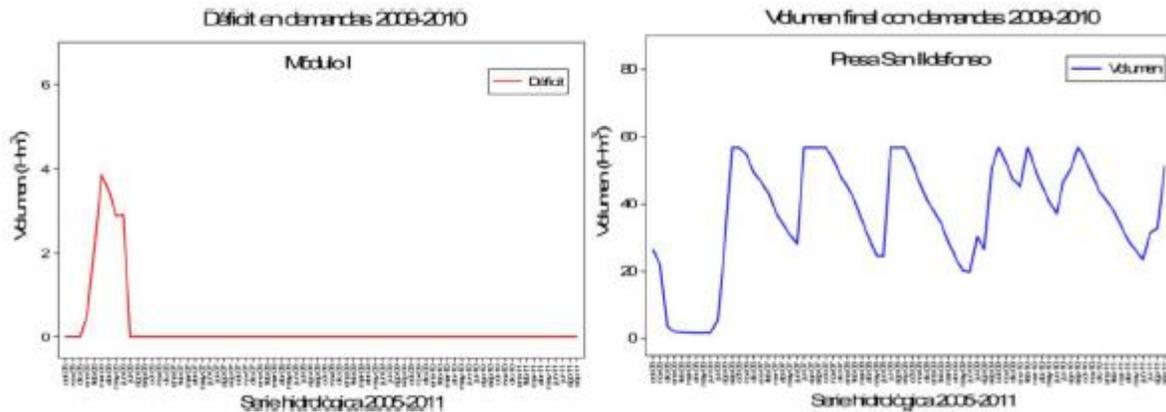


Figura 7.14. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

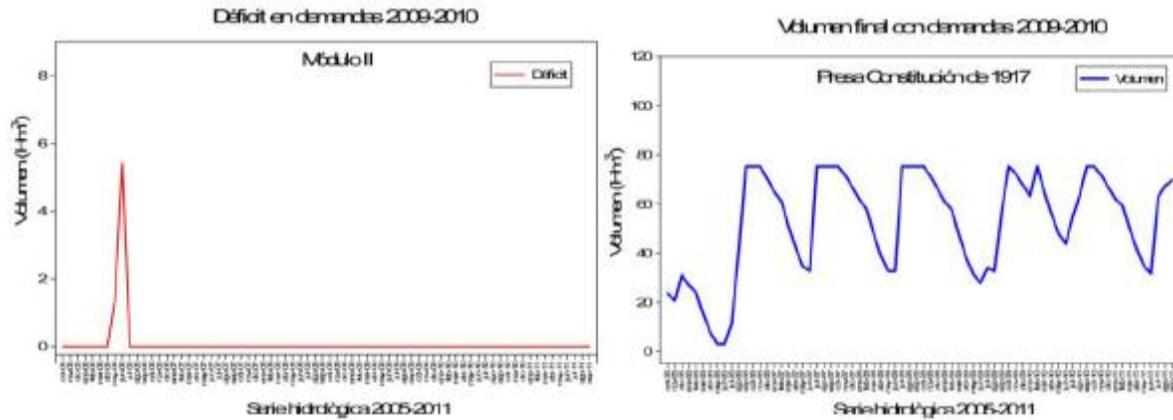


Figura 7.15. Gráfico de Déficit en el Módulo II y Volumen final en la presa Constitución de 1917.

Para 2011-2012 tampoco hubo cambios significativos en el Módulo I que pudiesen ayudar al sistema, siendo la primera mitad del año 2006 la más vulnerable de toda la serie que se manejó (Figura 7.1.6).

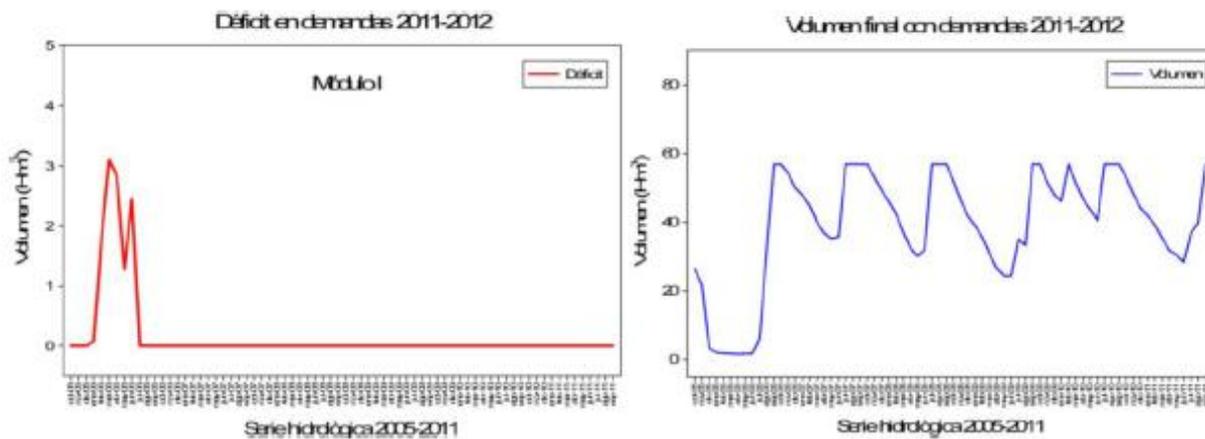


Figura 7.16. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

Escenario 2: Para cada periodo de año con sus demandas correspondientes se realizó la simulación disminuyendo un 25% la demanda mes con mes para cada uno de los dos módulos.

Para el primer caso alcanzó una reducción de 1 Hm<sup>3</sup> en el Módulo I, el Módulo II logró una mejora en la gestión con la reducción del Escenario 1 (Figura 7.17).

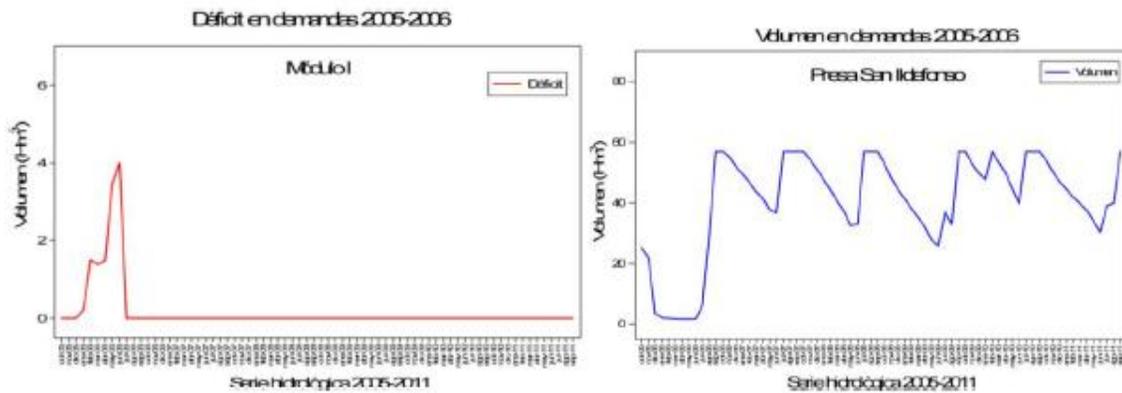


Figura 7.17. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

En las demandas 2009-2010 se tiene déficit en ambos módulos, aunque el mayor problema continúa en el Módulo I (Figura 7.18). El Módulo II podría considerarse que las demandas de agua están muy cerca de ajustarse al volumen de la presa y a lo que se logró recargar en esos meses críticos (Figura 7.19).

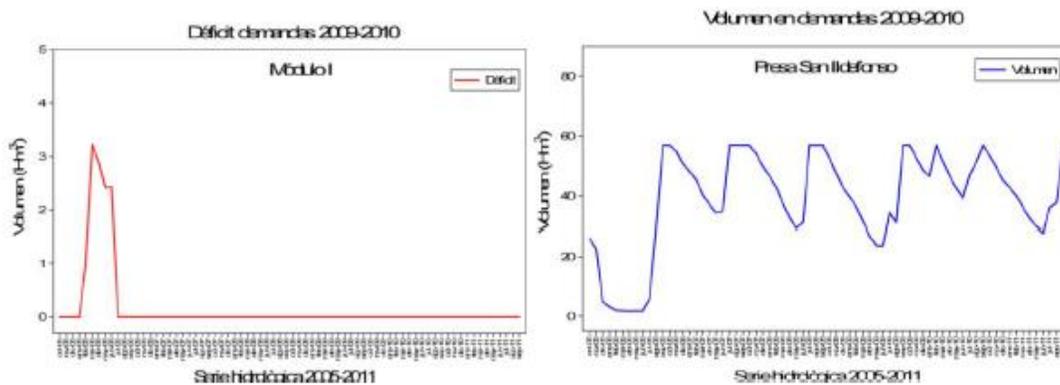


Figura 7.18. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

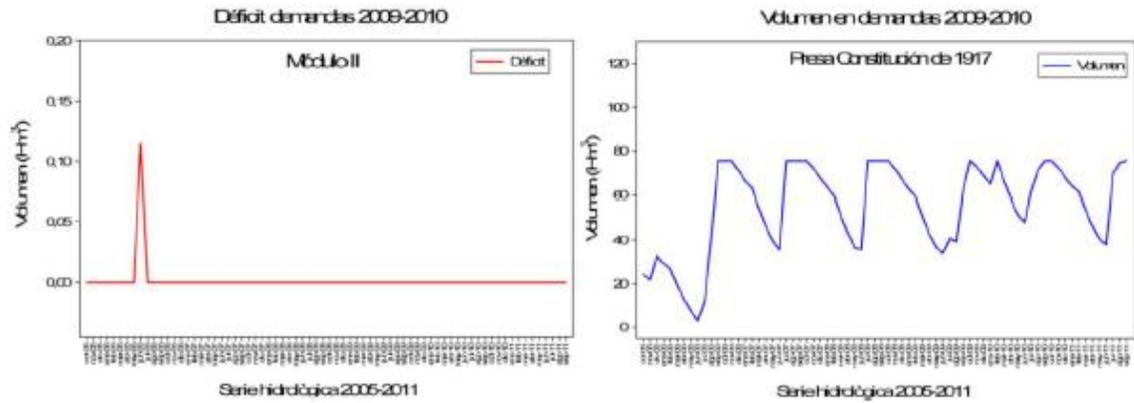


Figura 7.19. Gráfico de Déficit en el Módulo II y Volumen final en la presa Constitución de 1917.

En el último caso, 2011-2012 continua sin ser suficiente la reducción del volumen en el Módulo I, pero sólo de febrero-junio 2006, la mayor parte de la serie la presa San Ildefonso se encuentra con volumen mínimo de 20 Hm<sup>3</sup> (Figura 7.20).

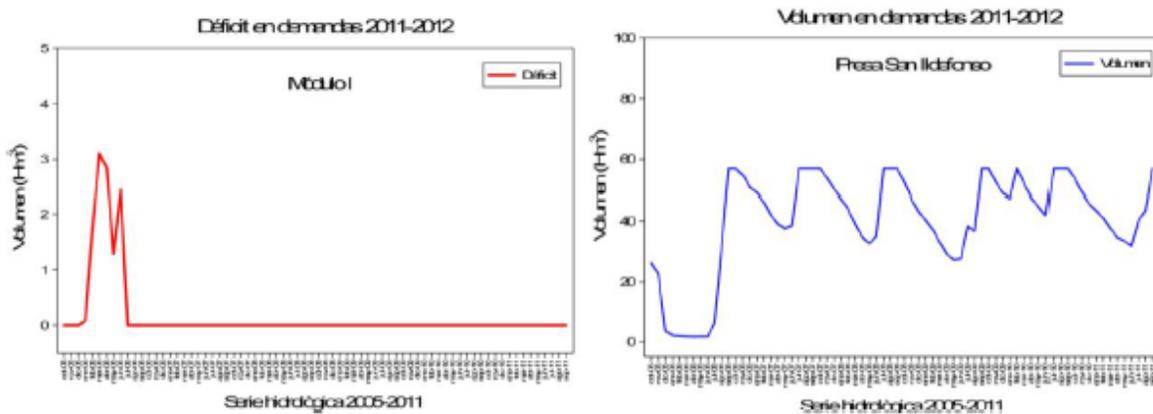


Figura 7.20. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

Escenario 3: Para cada periodo de año con sus demandas correspondientes se realizó la simulación disminuyendo un 50% la demanda mes con mes para cada uno de los dos módulos.

Como se muestra en las figuras a continuación, se tiene que para los tres casos los meses de febrero-junio 2006 fueron los más secos respecto a las aportaciones, ya que se redujo significativamente los volúmenes y no fue suficiente para satisfacer las nuevas demandas, para 2005-2006) se reduce el déficit de 4 Hm<sup>3</sup> a 2.8 Hm<sup>3</sup> (Figura 7.21). En 2009-2010 se observa que las demandas del Módulo II se ajustan al volumen existente en la presa Constitución de 1917, no así el Módulo (Figura 7.22)

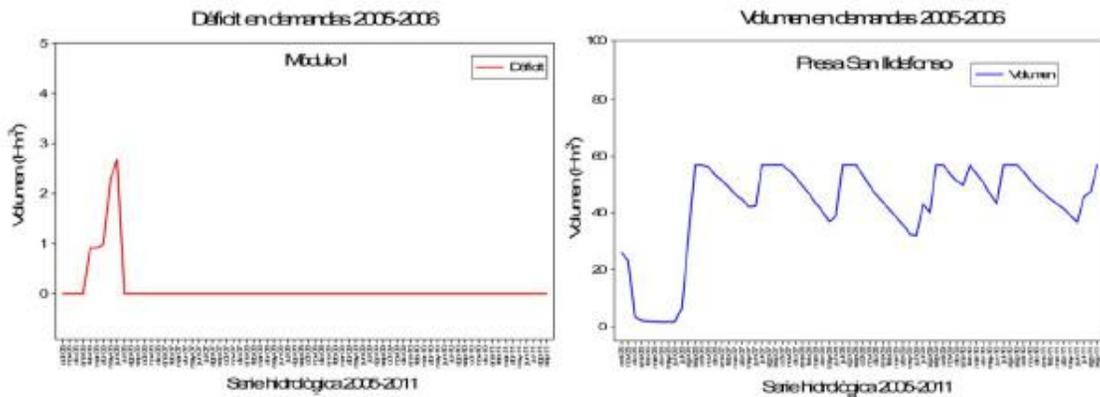


Figura 7.21. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

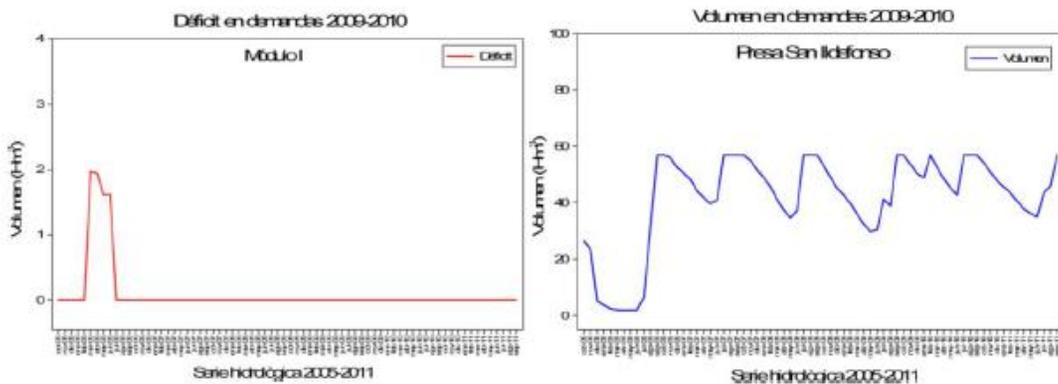


Figura 7.22. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso.

Las simulaciones para 2011-2012 tiene un déficit bajo de 1.5 Hm<sup>3</sup> en el Módulo I en los primeros meses del año 2006, el resto de la serie no tiene problema (Figura 7.23).

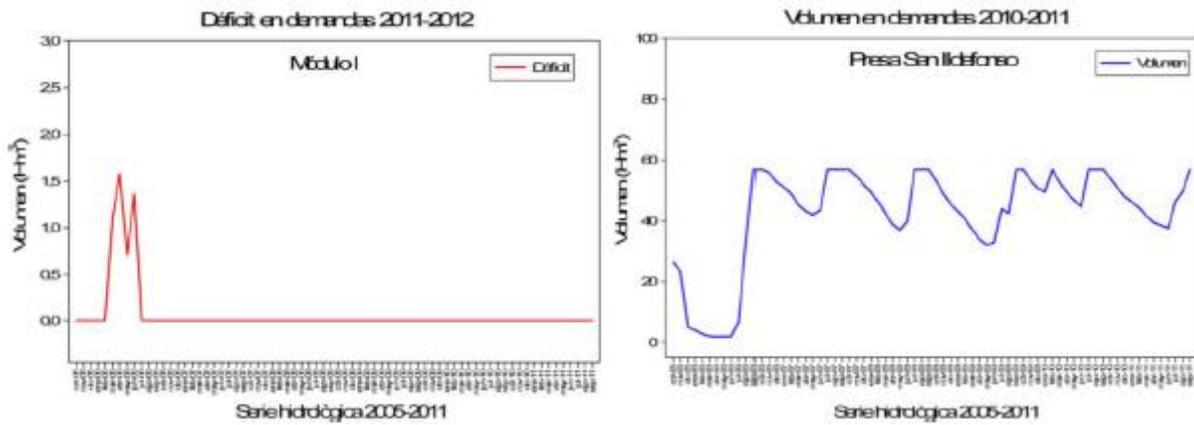


Figura 7.23. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso

Escenario 4: Con la demanda máxima del periodo 2005-2012 suponerla constante para todos los años del periodo de simulación. Se analizó el caso con la mayor demanda y se tomaron para una nueva simulación con los datos de infiltración, evaporación y aportaciones, siendo en el periodo 2007-2008 cuando se presentó el mayor volumen de extracción.

Tabla 7.1 Demandas mensuales 2007-2008

Mes/Año	Ildefonso	Constitución de 1917
oct-07	3.323	6.925
nov-07	4.857	5.452
dic-07	5.048	4.688
ene-08	5.532	6.691
feb-08	3.474	5.896
mar-08	4.883	9.244
abr-08	4.578	7.922
may-08	2.653	11.206
jun-08	3.396	5.275
jul-08	2.802	4.441
ago-08	2.930	6.648
sep-08	4.753	9.056
<b>Total =</b>	<b>48.230</b>	<b>83.442</b>

El Módulo I presenta tres distintos periodos críticos que también se ve reflejado en el volumen final de la presa San Ildefonso (Figura 7.24).

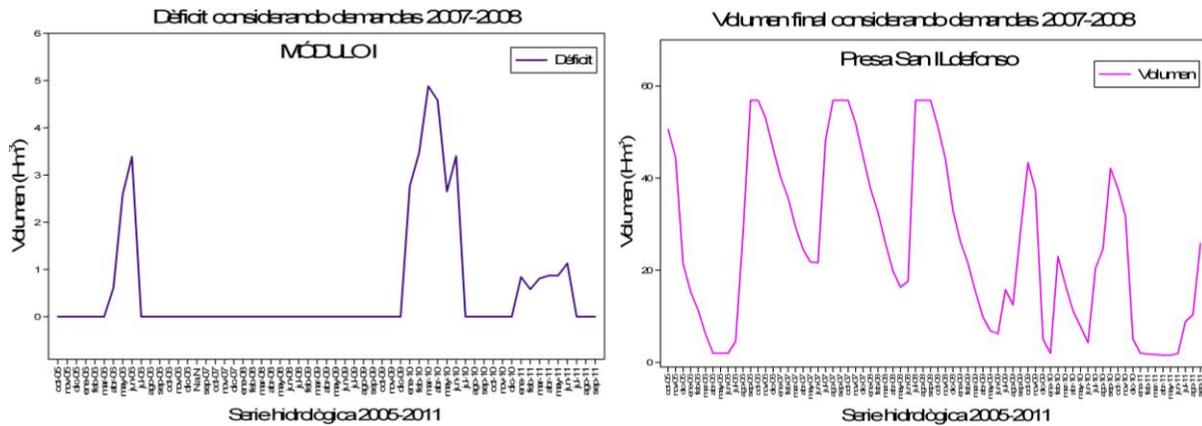


Figura 7.24. Gráfico de Déficit en el Módulo I y Volumen final en la presa San Ildefonso

Escenario 5: Con la demanda máxima del periodo 2005-2012 reducirla al 25% y observar el comportamiento de los embalses. Al realizar esta propuesta de reducción de las demandas resulta satisfactorio para todo el sistema, se observa que no existe déficit, el volumen mínimo de la presa San Ildefonso que es la más crítica no baja su volumen de 10 Hm<sup>3</sup>, lo que garantiza suministro al Módulo I. El Módulo II además de no tener déficit mantiene un volumen mínimo de 20 Hm<sup>3</sup> (Figura 7.25).

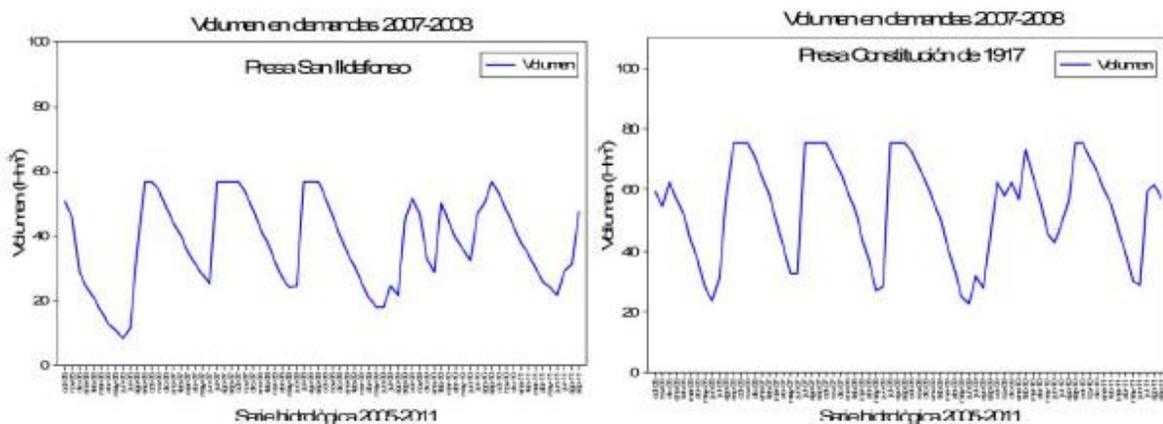


Figura 7.25. Gráfico de Volumen final en las presa San Ildefonso y Constitución de 1917.

### 7.3 Conclusiones

En los resultados de cada una de las simulaciones se observa que existe déficit en el Módulo I en toda la serie real analizada, específicamente en los meses marzo a julio del año 2006 y la única presa a la que corresponde suministrar el recurso para el Módulo I es San Ildefonso, sin embargo también aporta agua para el Módulo II por medio del canal Alimentador Constitución de 1857 a la Presa Constitución de 1917, por lo que se ve limitada la aportación a esta zona de riego, por motivos de la gestión que existe se dificulta reducir el déficit en éste módulo. Por la información limitada que se tuvo del manejo u operación de las presas y del sistema en sí, se percibe que tienen como prioridad en el suministro el Módulo II, ya sea por tener mayor superficie de riego o por el tipo de cultivo en esa zona, no se tiene certeza.

El Módulo II demanda mayor volumen de agua, en las simulaciones se observa que el déficit es mínimo en las series de tiempo analizadas. Esta escasez del recurso en las presas presentadas mayormente en los últimos meses del 2005 y principios del 2006, y últimos meses del 2010 y primeros del 2011 comprueba la información mencionada por el personal de campo que labora en el DR 023. La Tabla 7.2 resume los resultados de las simulaciones con los distintos escenarios propuestos para una nueva gestión, con el fin de mitigar el déficit causado por demandas de agua en temporadas en que el agua de las presas no es suficiente para abastecer lo requerido.

Tabla 7.2 Síntesis de los resultados de los escenarios propuestos

Simulación	2005-2006		2006-2007		2007-2008		2008-2009		2009-2010		2010-2011		2011-2012	
	M I	M II												
Real	D	D	D	----	D	----	D	----	D	D	D	----	D	----
* 10%	D	----	D	----	D	----	----	----	D	D	D	----	D	----
* 25%	D	----	D	----	----	----	----	----	D	D	D	----	D	----
* 50%	D	----	----	----	----	----	----	----	D	D	D	----	D	----

\* Reduciendo en porcentaje la demanda mensual  
M I = Módulo I      M II = Módulo II      D = Déficit      ---- = Sin Déficit

Considerando los periodos de cultivo Primavera-Verano y Otoño-Invierno que el modelo toma en cuenta en forma conjunta el periodo más crítico es el 2009-2010, ya que a pesar de disminuir las demandas hasta en un 50% no fue posible reducir el déficit en al menos uno de los módulos en ninguno de los escenarios propuestos. Además, como se observa en la Figura 6.5 y 6.6 el almacenamiento en ambas presas tiene una tendencia a disminuir a partir del 2009 hasta el 2012, en el periodo 2005-2006 también presenta menos aportación cuando la presa Constitución de 1917 disminuyó su almacenamiento a 0.163 Hm<sup>3</sup> de toda su capacidad. Se pone a consideración hacer un cambio en las prioridades en la distribución de agua a las presas y evaluar con este cambio si existe o no déficit en los módulos.

El análisis se llevó a cabo con algunas políticas básicas de operación indicadas por los responsables de operar el DR 023 y relacionadas principalmente con eventos extremos en que los caudales aumentaran o las presas alcanzaran sus niveles máximos de capacidad, sin embargo hubo una parte importante que no fue posible obtenerla, fue parte de las propuestas para realizar el trabajo que consistió en valorar el caudal mensual en cada toma de acuerdo a las necesidades de las demandas, los eventos extremos del ciclo hidrológico en función del volumen anual previsto según las necesidades de los agricultores; las reglas de operación se determinaron para los meses de principio de año agrícola (octubre) e inicio de temporada de lluvias (mayo), de acuerdo a, sin embargo es necesario conocer toda la información a detalle del modo de operar las presas y las derivadoras con el fin de acercar más a la realidad la simulación y de esta manera obtener una mejora sustancial en beneficio de los agricultores, con la consecuente eficiencia de los SRH al cual pertenece el DR 023.

Es importante hacer énfasis que el manejo y obtención de la información, el tener acceso público, la información actualizada y modernizada son un elemento clave para poder representar lo que ocurre en el sistema de manera más acertada, y en base a esto poder hacer cambios que puedan mejorar la distribución del recurso y lograr una administración más adecuada de los recursos disponibles.

Se propone una investigación del Distrito de Riego 023 que tenga como finalidad un Manual de Operación de todo el sistema, en base a lo ya realizado y con ayuda de la herramienta AquaTool y en el presente trabajo, complementándolo con información que sea necesaria.

## Literatura citada

- Aguilera Federico. 1992. Economía del agua. Ministerio de Agricultura, Economía y Medio Ambiente, 66-77.
- Álvarez-Mendiola, E. 2011. Diseño de una política eficiente de precios del agua. Integración de costes de oportunidad del recurso a escala de cuenca. Editorial Académica Española. ISBN 978-3-8443-4311-3.
- Andreu, J., J. Capilla y E. Sanchis, 1996. AQUATOOL, a generalized decision support system for water resources planning and management. *Journal of Hydrology*. 177: 269-291.
- Barkin David 2011. Water Resources in Mexico. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace. 7. 379-393.
- Bromley, D. 1991 *Environment and Economy: Property Rights and Public Policy*, Oxford: Blackwell.
- Bulatewicz T., X. Yang, J. M. Peterson, S. Staggenborg, S. M. Welch, and D. R. Steward. 2010. Accessible integration of agriculture, groundwater, and economic models using the Open Modeling Interface (OpenMI): methodology and initial results. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 521–534.
- Castellano E., Martínez P., Elorrieta J., Pellitero M., Rey C., 2008. *Environ Resource Econ* 39:331–356.
- Estadísticas de Agua en México, 2011. CONAGUA.
- Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2008-2009, 2010. Comisión Nacional del Agua
- Heinz, I., 2006. The Economic Value of Water. In *International Workshop on Hydro-economic Modeling and Tools for the Implementation of the European Water Framework Directive*. Valencia, Spain.
- Ibáñez L., Chávez J., Marín M. 1997. A Planning Model for the Fuerte-Carrizo Irrigation System, Mexico. *Water Resources Management*. 11: 165–183.
- Fisher M., Arlosoroff S., Eckstein Z., Haddadin M., Hamati S., Huber-Lee A., Jarrar A., Jayyousi A., Shamir U. and Wesseling H. 2001. Optimal wáter management and conflict resolution: The Middle East Water Project. *Water Resources Research*. 38 (11): 1243.
- Jayyousi Anan. 2001. Application of Water Allocation System Model to the Palestinian Israeli Water Conflict. *Water and Environmental Studies Institute*, An-Najah N.University, Nablus, Palestine.

- Sevilla Martín, Torregrosa Teresa y Moreno Luis. 2010. “Un panorama sobre la economía del agua”. Estudios de economía aplicada. Vol. 28-2, pags 265-304. Departamento de Análisis Económico Aplicado, Universidad de Alicante España.
- Savenije, H., 2001. Why water is not an ordinary economic good? Proceedings of the Second WaterNet/WARFSA Symposium on ‘Integrated Water Resources Management: Theory, Practice, Cases’ Cape Town, South Africa: IHE, Delft.
- Tilmant A., Kinzelbach , Juizo L., Beevers, Senn D. and Casarotto C. 2012. Economic valuation of benefits and costs associated with the coordinated development and management of the Zambezi river basin. Water Policy. 14: 490-508.
- Ward Frank A. 2012. Cost-benefit and water resources policy: a survey. Water Policy. 14: 250-280.
- Young, R., 2005. Determining the Economic value of Water. Washington DC, U.S.A. RFF Press. 340 pp.
- Zarghaami Mahdi., 2006. Integrated Water Resources Management in Polrud Irrigation System. Water Resources Management. 20: 215–225.
- Zilberman, D., y Schoengold, K., 2007. The Economics of Water, Irrigation and Development, Handbook of Agricultural Economics, Vol. 3, Edited by Robert Evenson y Prabhu Pingali,.