



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# FACULTAD DE INGENIERÍA

NOMBRE DE LA TESIS

**MODELACIÓN CONJUNTA DE RECURSOS  
HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS**

Caso de estudio en la cuenca media del río Sonora

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A

DIONISIO CALDERÓN ESTRADA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. FERNANDO GONZÁLEZ VILLARREAL

MÉXICO, D.F.

JUNIO, 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Contenido

---

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Ciclo hidrológico del agua	1
1.2	Uso conjunto de recursos hídricos subterráneos y superficiales	2
1.2.1	Recursos superficiales	2
1.2.3	Recursos subterráneos	5
1.2.4	Uso conjunto y sus finalidades	6
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1	Cuenca hidrológica	7
2.1.1	Definición de cuenca hidrológica	7
2.1.2	Características de las cuencas	8
2.1.3	Tipos de cuencas	8
2.2	Acuíferos	10
2.2.1	Definición de manto acuífero	10
2.2.2	Clasificación de acuíferos	10
2.3	Infiltración	11
2.3.1	Definición de infiltración	11
2.3.2	Proceso de infiltración	11
2.3.3	Métodos de cálculo	12
2.4	Relación río-acuífero	15
2.4.1	Descripción de la relación río-acuífero	15
2.4.2	Metodología de cálculo clásica	18
2.5	Balance hídrico	20
2.5.1	Definición	20
2.5.2	almacenamiento superficial	21
2.5.3	Almacenamiento de agua subterránea	22
2.5.4	Balance hídrico de una cuenca	23
<b>3</b>	<b>Revisión de software actual para el apoyo en la modelación de recursos hídricos</b>	<b>24</b>
3.1	Clasificación de modelos actuales	24
3.1.1	Según su información de entrada	24
3.1.2	Según el tipo de representación	24
3.1.3	Según la aleatoriedad	25
3.1.4	Según su aplicación	25
3.2	Ventajas y desventajas de modelos comunes	25
3.2.1	Modelo HEC-RAS	25
3.2.2	Modelo MIKE SHE	26
3.2.3	WEPP (Water Erosion Prediction Project)	27
3.2.4	Modelo SIMGES (Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos)	29
3.2.5	CEQUEAU	30
3.2.6	Modelo WEAP (water evaluation and planning system)	31
<b>4</b>	<b>Aplicación en la cuenca media del Río Sonora</b>	<b>34</b>

<b>4.1 Objetivo de modelación y elección del modelo.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.1 Caracterización de la zona de estudio.....</b>	<b>34</b>
4.2.2 Definición y descripción de la zona de estudio.....	36
4.2.3 Recursos superficiales .....	38
4.2.4 Recurso subterráneo .....	40
4.2.5 Infraestructura hidráulica existente .....	42
4.2.6 Análisis de la demanda .....	46
<b>4.3 Formulación del modelo de optimación en software WEAP .....</b>	<b>47</b>
4.3.1 Water Evaluation and Planing System .....	47
4.3.2 Descripción del modelo actual .....	53
4.3.3 Descripción de variables de decisión.....	59
4.3.4 Datos de entrada .....	63
4.3.5 Sistema de prioridades .....	65
4.3.6 Operación de cada elemento .....	65
4.3.7 Simulaciones especiales .....	70
4.3.8 Resultados .....	75
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>82</b>
Cuenca media del río Sonora .....	82
<b>5. Bibliografía .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo A. Tabla de escurrimientos históricos.....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo B. Balances promedio por periodo en las CMA y CMB.....</b>	<b>106</b>

## 1 Introducción

### 1.1 Ciclo hidrológico del agua

El ciclo hidrológico del agua se desarrolla dentro de la hidrósfera, esta se extiende aproximadamente quince kilómetros arriba de la atmosfera y alrededor de un kilometro bajo la corteza terrestre, como todo ciclo el del agua no tiene principio ni fin así que su descripción puede comenzar en cualquier punto.

El agua que se encuentra cerca de la superficie terrestre y oceanica se evapora por efecto de la radiacion solar y el viento, el vapor de agua que se forma se eleva y se transporta por la atmosfera en forma de nubes hasta que se condensa y se precipita sobre la superficie terrestre u oceanica, al agua precipitada puede ser interceptada por la vegetacion, infiltrarse en el suelo, correr como flujo subsupecífico, correr como flijujo superficial y descargar en los rios como escorrentia superficial. La escorrentia superficial llega a cuerpos de agua como vasos de presas, lagos o el oceano, gran parte del agua que escurre y se almacena en los cuerpos de agua regresa a la atmosfera por medio de la evaporacion, el agua infiltrada puede percolarse y recargar un manto acuífero o correr en rios subterranos hasta un cuerpo de agua superficial o llegar al oceano para repetir el ciclo.



Ilustración 1. Ciclo hidrológico

## 1.2 Uso conjunto de recursos hídricos subterráneos y superficiales

---

### 1.2.1 Recursos superficiales

---

Los lagos y embalses contienen aproximadamente dos tercios del agua dulce superficial y atmosférica de la Tierra. La administración del agua en estos cuerpos de agua puede ayudar a las comunidades a mitigar la variabilidad estacional y anual en la precipitación pluvial anual y en el agua de escorrentía.

Los embalses constituyen una fuente de suministro de agua relativamente fiable que se puede manejar con algún grado de confiabilidad. Cuando existe un incremento repentino en la demanda de agua, quizá durante la temporada agrícola alta durante la primavera, los embalses pueden satisfacer el exceso de demanda con recursos que se han recolectado durante todo el año. Los embalses o reservorios con represas artificiales pueden además generar energía hidroeléctrica, a menudo a una escala que las vuelve atractivas para muchos encargados de elaborar políticas. A finales del siglo XX, había más de 45.000 presas en todo el mundo con una altura de 15 metros o más.

Pero los embalses tienen también sus desventajas. Las aguas a cielo abierto están sujetas a evaporación con índices que varían según el clima. En algunas regiones, el 20 por ciento de la escorrentía total anual se pierde en la atmósfera.

Los embalses pueden causar daños ambientales significativos al impedir el movimiento de sedimento y creando por esa razón erosión corriente abajo, interrumpiendo el ciclo de vida de especies de peces que deben viajar corriente arriba para desovar, y cambiando el momento y la cantidad de caudal corriente abajo, lo cual puede causar impacto en las plantas y especies animales en el río y sus zonas de inundación.

Las estructuras de embalse con presas están sujetas a sedimentación, lo cual, en el transcurso del tiempo reduce su capacidad de almacenamiento de agua. Cuando el agua de escorrentía queda atrapada detrás de las presas, no existe una salida para los sedimentos que son transportados hacia el embalse por medio del agua que escurre. Algunas veces se puede extraer los fangos de estos embalses, pero el proceso requiere volúmenes grandes de agua para “lavar” los fangos y enviarlos corriente abajo donde también pueden causar impactos negativos en el medioambiente.

#### 1.2.1.1 Ríos

---

Los ríos son los caminos naturales por los que escurre el agua tratando de regresar al mar, tienen un caudal que varía durante todo el año, el agua que escurre proviene de agua de lluvia, deshielo de montañas y agua subterránea.

Una clasificación de los ríos según su periodo de actividad es la siguiente:

- Perenes. Estos ríos están formados por cursos de agua localizados en regiones de lluvias abundantes con escasas fluctuaciones a lo largo del año, sin embargo, incluso en las áreas donde llueve muy poco pueden existir ríos con caudal permanente si existe una alimentación freática suficiente.

- Estacionarios. Estos ríos son de zonas con clima tipo mediterráneo, en donde hay estaciones muy diferenciadas, con inviernos húmedos y veranos secos o viceversa. Suelen darse más en zonas de montaña que en las zonas de llanura.
- Transitorios. Son los ríos de zonas con clima desértico o seco, de caudal que a veces, en los cuales se puede estar sin precipitaciones durante años. Esto es debido a la poca frecuencia de las tormentas en zonas de clima de desierto. Pero cuando existen descargas de tormenta, que muchas veces son torrenciales, los ríos surgen rápidamente y a gran velocidad.



Ilustración 2. Ríos Principales de México y sus cuencas

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros, en la que destacan cincuenta ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país.

Dos terceras partes del escurrimiento superficial pertenece a siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá. La superficie de sus cuencas representa el 22% de la del país. Los ríos Balsas y Santiago pertenecen a la vertiente del Pacífico y los otros cinco a la vertiente del Golfo de México.

Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma, Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior.

En el Pacífico desembocan los ríos Lerma y Balsas, de vital importancia para las ciudades de las tierras altas de México; los ríos Sonora, Fuerte, Mayo y Yaqui; que sostienen la próspera agricultura del noroeste del país, y el río Colorado, compartido con Estados Unidos. Los ríos interiores, es decir, aquellos que no desembocan en el mar, suelen ser cortos y con caudal escaso. Destacan el río Casas Grandes en Chihuahua, y el Nazas, en Durango.

### 1.2.2.2 Lagos

Los lagos son cuerpos de agua naturales asociados a un origen glacial, el agua que se aloja en un lago proviene generalmente de la desembocadura de un río ó al afloramiento de aguas freáticas.

Es posible deducir el origen de un lago si se observa su contorno. Un lago es un cuerpo de agua estancada en una depresión del suelo. Las depresiones lacustres se han formado a partir de una o varias fuerzas del subsuelo.

Los lagos muy profundos quizás surgieron a raíz de movimientos tectónicos, esto es, cuando se hundieron bloques de la corteza terrestre; los redondos y de bordes altos tal vez se formaron cuando se desplomó o voló el cráter de un volcán; los alargados podrían ser restos de valles glaciares; por último, los de forma de media luna son por lo regular producto de cambios más recientes en el curso de río. No obstante, ninguno de estos cuerpos de agua dulce es permanente.

Una clasificación de los lagos de acuerdo a su duración y disminución es:

- Lago permanente. Es un lago que se encuentra en equilibrio hídrico es decir el agua que pierde es el agua que recibe.
- Lago efímero. Este tipo de lagos son cuerpos de agua de corta duración.
- Lago intermitente. Son cuerpos de agua que se llenan estacionariamente.
- Lago residual. Es el remanente de un lago mucho mayor que se ha ido secando.

México alberga numerosos lagos y lagunas en su territorio, pero de tamaño modesto. El más importante cuerpo interior de agua es el lago de Chapala (chapalapachala), en el estado de Jalisco, y que a causa de la sobreexplotación está en riesgo de desaparecer. Otros lagos importantes son el lago de Pátzcuaro, el Zirahuén y el Cuitzeo, todos ellos en Michoacán. Además, la construcción de presas ha propiciado la formación de lagos artificiales, como el de las Mil Islas, en Oaxaca.

**Tabla 1. Principales Lagos de México**

Área y volúmenes de almacenamiento de los lagos principales de México				
Lago	Área de la cuenca	Capacidad de almacenamiento	Región Hidrológico Administrativa	Entidad Federativa
	km <sup>2</sup>	millones de m <sup>3</sup>		
Chapala	1116	8126	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Jalisco y Michoacán de Ocampo
Cuitzeo	306	920	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Michoacán de Ocampo
Pátzcuaro	97	550	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Michoacán de Ocampo
Yuriria	80	188	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Guanajuato
Catemaco	75	454	X Golfo Centro	Veracruz del Ignacio de la llave
Tequesquitengo	8	160	IV Balsas	Morelos
Nabor Carrillo	10	12	XIII Aguas del Valle de México	México

### 1.2.3 Recursos subterráneos

---

El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y, eventualmente, llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos.

Un par de factores importantes son los responsables de la existencia del agua subterránea: la gravedad, que mueve al agua hacia el centro de la Tierra, y el tipo de rocas, que de acuerdo con su porosidad, almacenarán más o menos agua.

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se les extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así, el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados.

La unidad básica para el manejo del agua es la cuenca hidrológica, en la cual se considera la forma en que escurre el agua en la superficie (cuencas hidrográficas) y en el subsuelo (acuíferos). Con esta base, se integraron las trece regiones hidrológico-administrativas en que se organiza el país para fines de administración del agua.

La importancia del agua subterránea queda de manifiesto por la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios; cerca del 37% (29.5 miles de millones de m<sup>3</sup>/año al 2008) del volumen total concesionado para usos consuntivos, es de origen subterráneo. Para fines de administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001. Para el 31 de diciembre de 2009 se tenían 282 acuíferos con disponibilidad publicada en el DOF.

A partir de la década de los años setenta, ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en 2006. De ellos se extrae casi el 60% del agua para todos los usos.

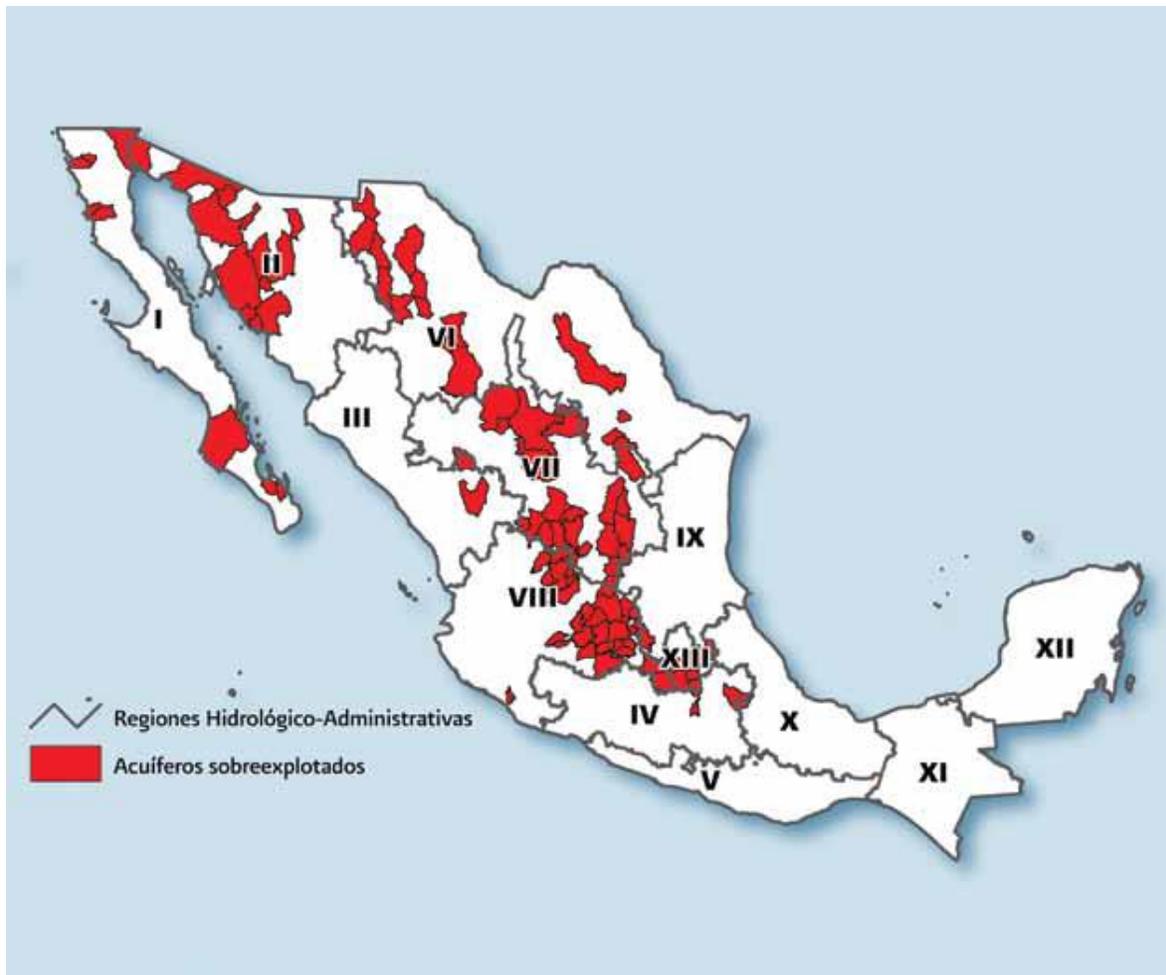


Ilustración 3. Acuíferos sobre explotados de México

#### 1.2.4 Uso conjunto y sus finalidades

Cuando los acuíferos de aguas subterráneas y los sistemas de ríos se encuentran en la misma cuenca, éstos se pueden administrar como un solo recurso interconectado. Esta práctica se conoce como uso conjunto, y puede permitir el uso muy eficiente de los recursos superficiales y subterráneos.

Los planes de uso conjunto, en pocas palabras, pueden simplemente modificar los patrones de uso del agua. Los administradores comunitarios quizá decidan dejar intactos los recursos de agua subterránea en los años lluviosos o durante la época de monzones cuando el agua superficial es abundante. Una política así conservaría el agua subterránea para las épocas de sequía estacional o prolongada. Durante las épocas más lluviosas los acuíferos permanecen intactos y pueden recargarse naturalmente por medio de la infiltración y otros procesos de ciclo del agua.

Otros sistemas de uso conjunto son mucho más complejos y pueden involucrar extensas inversiones en infraestructura. Muchos están diseñados para recolectar la precipitación pluvial, o para desviar y almacenar el agua de escorrentía superficial. En dichos sistemas el exceso de agua superficial se puede canalizar hasta lagunas, pantanos u otros cuerpos de agua naturales desde las cuales ésta puede infiltrarse hacia el subsuelo y recargar de manera natural los depósitos de agua subterránea debajo de los mismos.

En algunos casos, el exceso de agua superficial se puede conducir más agresivamente hacia el subsuelo mediante el uso de pozos que inyectan agua en vez de bombearla hacia afuera, y otras tecnologías diseñadas para reforzar rápidamente las reservas de agua subterránea. Estos procesos se conocen como recarga artificial. Los acuíferos de agua subterránea ofrecen varias ventajas en comparación con las opciones de almacenamiento superficial, entre ellas, la protección contra la evaporación, y la recarga artificial puede reabastecer incluso a los acuíferos confinados que se encuentren aislados del sistema de agua superficial. Sin embargo, las presas y los embalses pueden acomodar grandes volúmenes del exceso de agua en corto tiempo, algo que los acuíferos recargados artificialmente no pueden hacer.

El uso conjunto permite a los administradores la utilización de las ventajas de los recursos superficiales y subterráneos y reducir al mínimo sus desventajas. El resultado es un uso más eficiente del agua.

Existen dos principales problemas con el uso conjunto, uno de ellos y posiblemente el más importante es la falta de planificación en la explotación del recurso subterráneo permitiendo la construcción de pozos de manera aleatoria y teniendo una extracción poco controlada, el otro asunto a discutir es que no se aprovechan los almacenamientos subterráneos como contra embalses.

## 2. Marco teórico

---

### 2.1. Cuenca hidrológica

---

#### 2.1.1 Definición de cuenca hidrológica

---

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio de la hidrología. Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de agua que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Asociada a una cuenca superficial existe una cuenca subterránea, la forma en planta de la cuenca subterránea es semejante a la de la cuenca superficial.

Una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrológica se diferencian en que la cuenca hidrográfica se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la cuenca hidrológica incluye las aguas subterráneas, acuíferos.

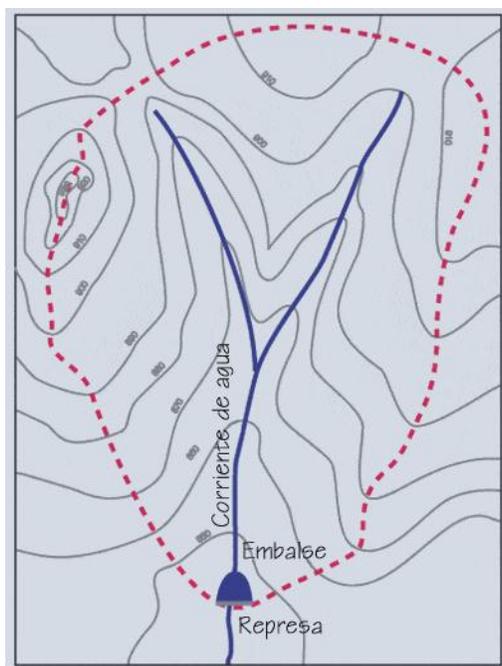


Ilustración 4. Cuenca Hidrológica

### 2.1.2 Características de las cuencas

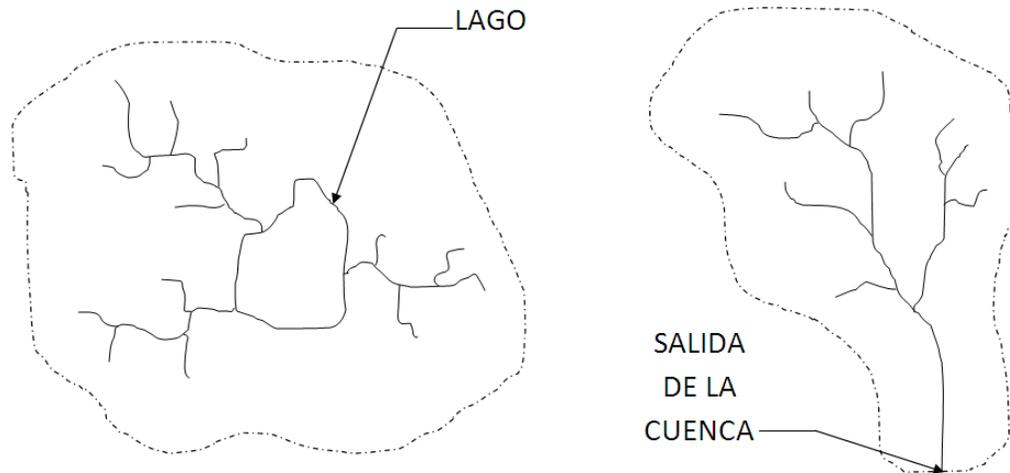
El ciclo hidrológico, visto a nivel cuenca, se puede esquematizar como un estímulo al que la cuenca responde mediante un escurrimiento de salida. Las características de una cuenca se clasifican en dos tipos: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces.

El parte aguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y delimita a la cuenca de cuencas vecinas. Área de la cuenca es la proyección horizontal del área delimitada por el parte aguas. El cauce principal es el de mayor caudal medio y las corrientes tributarias son todas las que llegan hasta el cauce principal.

### 2.1.3 Tipos de cuencas

Dependiendo de la dirección en la que drenan, las cuencas se pueden clasificar en:

- Cuenca Endorreica. Es la cuenca en la que el flujo va en dirección de un lago ó almacenamiento, en esta el recurso hídrico no sale de la cuenca.
- Cuenca Exorreica. Es la cuenca en la que todos los flujos se dirigen a un cauce principal que esta direccionado a un punto de salida de la cuenca, en esta el recurso hídrico sale de la cuenca.



**Ilustración 5. Cuenca endorreica (izquierda) y cuenca exorreica (derecha)**

Existe una sub-clasificación de las cuencas exorreicas, esta depende del lugar al que desemboca el cauce principal:

- Cuenca Principal. Es llamada así la cuenca cuyo cauce principal desemboca directamente en el océano.
- Cuenca Tributaria. Es aquella en la que el cauce principal desemboca en otra cuenca, esta se encuentra fuera de la cuenca principal y su tamaño es indiferente.
- Micro-cuenca. Es una cuenca tributaria que se encuentra dentro de una cuenca principal o dentro de otra tributaria, el cauce principal en este tipo de cuenca es un cauce tributario, no desemboca en el océano.

Así por ejemplo podremos tener un sistema de cuencas en el que varias micro-cuencas formen una cuenca tributaria y varias cuencas tributarias se unirán en una sola cuenca principal que terminara drenando en el océano.

Si además al sistema de cuencas le agregamos un sistema de hojas de escurrimiento, entonces podremos tener una base de datos muy completa que describirá una cuenca principal.

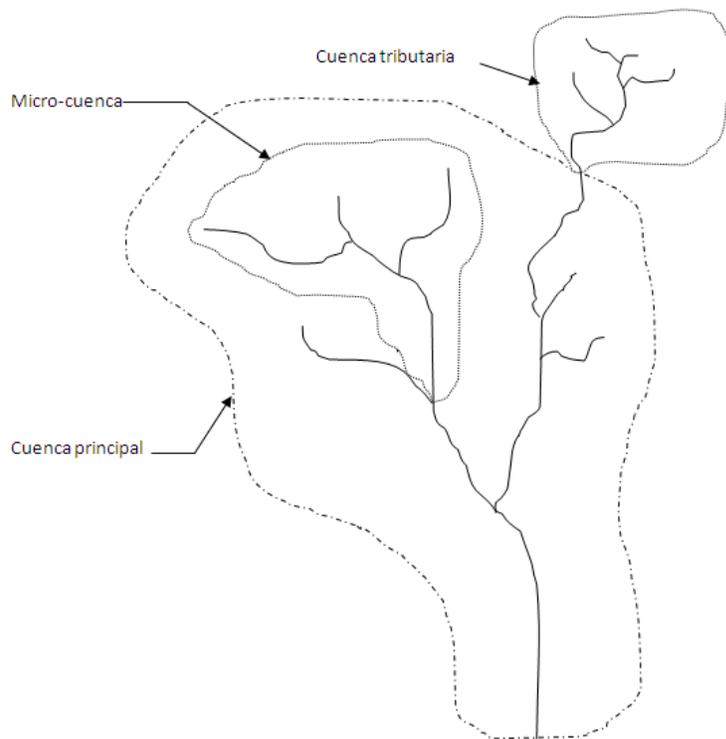


Ilustración 6. Clasificación de cuencas

## 2.2 Acuíferos

### 2.2.1 Definición de manto acuífero

Un acuífero es aquel estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas. Dentro de estas formaciones podemos encontrarnos con materiales muy variados como gravas de río, limo, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla. El nivel superior del agua subterránea se denomina tabla de agua, y en el caso de un acuífero libre, corresponde al nivel freático.

### 2.2.2 Clasificación de acuíferos

Según su Comportamiento Hidráulico los acuíferos pueden clasificarse como sigue:

- Acuífero subestimado o libre: Es aquel acuífero que se encuentra en directo contacto con la zona sub-saturada del suelo. En este acuífero la presión de agua en la zona superior es igual a la presión atmosférica, aumentando en profundidad a medida que aumenta el espesor saturado.
- Acuífero confinado: Es aquel acuífero que se encuentra cubierto por algún nivel relativamente impermeable. En estos acuíferos la presión del agua es mayor que la presión atmosférica.
- Acuífero semi-confinado: un acuífero se dice semi-confinado cuando el estrato de suelo que lo cubre tiene una permeabilidad significativamente menor a la del acuífero mismo, pero no llegando a ser impermeable, es decir que a través de este estrato la descarga y recarga puede todavía ocurrir.

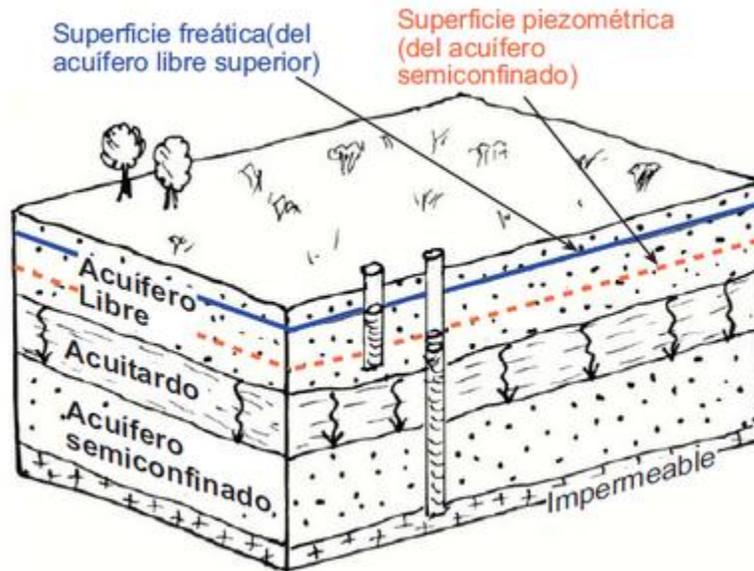


Ilustración 7. Tipos de acuíferos

## 2.3 Infiltración

### 2.3.1 Definición de infiltración

Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de pérdidas. En general, las pérdidas están constituidas por la interceptación en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos, la evaporación y la infiltración. Además de que en la práctica es difícil separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre.

### 2.3.2 Proceso de infiltración

El proceso de infiltración puede describirse de la siguiente manera:

Considérese un área de suelo suficientemente pequeña, de modo que sus características, así como la intensidad de la lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes. Supóngase que, al inicio de una tormenta, el suelo está seco de manera que la cantidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo es mayor que la intensidad de la lluvia en esos primeros instantes de la tormenta. Bajo estas condiciones, se infiltraría toda la lluvia.

$$i < f_p, f = i \quad (2.1)$$

Donde:

$f$ ; Infiltración, expresada como lámina por unidad de tiempo

$i$ ; Intensidad de la lluvia

$f_p$ ; Capacidad de infiltración, expresada como lámina por unidad de tiempo

En esta parte del proceso las fuerzas producidas por la capilaridad predominan sobre las gravitatorias. Al avanzar el tiempo, si la lluvia es suficientemente intensa, el contenido de humedad en el suelo aumenta hasta que su superficie alcanza la saturación. En este momento se empiezan a llenar las depresiones del terreno, se originan charcos y comienza a producir flujo sobre la superficie. A este instante se le llama tiempo de encharcamiento y se denota como  $t_p$ .

Después del tiempo de encharcamiento, si la lluvia sigue siendo intensa, las fuerzas capilares pierden importancia frente a las gravitatorias, pues el contenido de humedad del suelo aumenta y la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo. Además, bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia, en tanto que ésta sea mayor que la capacidad de transmisión del suelo.

$$i > f_p, \quad t > t_p, \quad f = f_p \quad (2.2)$$

Donde  $f_p$  decrece con el tiempo.

Bajo las condiciones anteriores, la capa saturada, que en el tiempo de encharcamiento era muy delgada y estaba situada en la superficie del suelo, se ensancha a medida que su límite inferior, denominado frente húmedo, baja. Entonces, dado que cada vez una mayor parte del suelo está saturada, las fuerzas capilares pierden importancia paulatinamente hasta que llega un momento, teóricamente en  $t = \infty$ , en que, el estar todo el medio saturado, el movimiento del agua se produce sólo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se hace constante.

Si después del tiempo de encharcamiento la tormenta disminuye su intensidad hasta hacerse menor que la capacidad de infiltración, el tirante de agua existente sobre la superficie del suelo disminuye hasta desaparecer y el agua contenida en los charcos también se infiltra, y en menor grado se evapora.

Cuando ya no hay agua sobre la superficie del terreno, el contenido de humedad de las capas de suelo cercanas al frente húmedo se difunde, haciendo que dicho frente avance hacia arriba hasta que la superficie deja de estar saturada.

Posteriormente, la lluvia puede volver a intensificarse y alcanzar otro tiempo de encharcamiento repitiéndose todo el ciclo descrito.

### 2.3.3 Métodos de cálculo

Cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvia y volumen de escurrimiento en una cuenca, las pérdidas se pueden calcular como:

$$V_p = V_{ll} - V_{ed} \quad (2.3)$$

$V_{ed}$ ; Volumen de pérdidas

$V_{ll}$ ; Volumen de lluvias

$V_p$ ; Volumen de escurrimiento directo

Si ambos miembros de la ecuación 2.3 se dividen entre el área de la cuenca se obtiene:

$$F = I - R \quad (2.4)$$

$F$ ; Infiltración o lámina de pérdida acumulada

$I$ ; Altura de lluvia acumulada

$R$ ; Escurrimiento directo acumulado

Si la ecuación 2.4 se deriva respecto al tiempo:

$$f = i - r \quad (2.5)$$

Donde  $r$  es la lamina de escurrimiento directo por unidad de tiempo.

Para la aplicación de los métodos que simulan la relación lluvia escurrimiento es necesario conocer la variación en el tiempo de  $r$ . Para ello se usan comúnmente dos tipos de criterios en cuencas aforadas: el de la capacidad de infiltración media y el del coeficiente de escurrimiento.

### Criterio de la capacidad de infiltración media

Este criterio supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta. A esta capacidad de infiltración se le llama índice de infiltración media  $\Phi$ . Cuando se tiene un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, el índice de infiltración media se calcula de la siguiente manera:

- Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.
- Se calcula la altura de lluvia en exceso o efectiva  $h_{pe}$  como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca:

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad (2.6)$$

- Se calcula el índice de infiltración media  $\Phi$  trazando una línea horizontal en el hidrograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a  $h_{pe}$ . El índice de infiltración media  $\Phi$  será entonces igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que dure cada barra del hidrograma.

### Criterio del coeficiente de escurrimiento

Con este criterio se supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la lluvia, esto es:

$$\begin{aligned} f &= (1 - Ce) * i \\ r &= Ce * i \end{aligned} \quad (2.7)$$

Donde la constante de proporcionalidad  $Ce$ , sin unidades, se denomina coeficiente de escurrimiento. Otra manera de escribir la ecuación es:

$$V_{ed} = Ce * V_{ll} \quad \text{ó} \quad Ce = \frac{V_{ed}}{V_{ll}} \quad (2.8) \text{ y } (2.9)$$

### Criterio del United States Soil Conservation Service (USSCS)

Según este criterio la relación entre el coeficiente de escurrimiento y la altura de precipitación total de una tormenta está dada por:

$$Ce = \frac{(P-0.2*S)^2}{P^2+0.8*S*P} \quad (2.10)$$

Donde  $P$  es la altura total de precipitación de la tormenta y  $S$  es un parámetro por determinar, con las mismas Unidades de  $P$ .

El parámetro  $S$  se puede estimar si se conocen varias parejas de valores ( $P, Ce$ ); el valor de  $S$  puede tomarse como el que hace que la variancia del error cometido al calcular  $Ce$  con la ecuación 2.10, con respecto al coeficiente de escurrimiento real, sea mínima.

### Otros métodos

Se han hecho numerosos intentos por representar el proceso de infiltración de alguna fórmula más o menos empírica. La fórmula más conocida es tal vez la llamada de Hartan, publicada por primera vez en 1921 por Gardner y Widstoe y años después, en 1940, y de manera aparentemente independiente, por Hartan.

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-kt} \quad (2.11)$$

Donde  $f_p$  es la capacidad de infiltración y  $f_0$ ,  $f_c$  y  $k$  son constantes empíricas. Wilson propone los valores de  $f_0$ ,  $f_c$  y  $k$  que se muestran en la tabla para algunos tipos de suelo.

Tabla 2. Valores propuestos por Wilson para las constantes  $f_0$ ,  $f_c$  y  $k$

Tipo de suelo		$f_0$ mm/h	$f_c$ mm/h	$k$ min <sup>-1</sup>
Agrícola normal	desnudo	280	6 a 220	1.6
	cubierto de vegetación	900	20 a 290	0.8
Turba		325	2 a 20	1.8
Areno-arcillosos	desnudo	210	2 a 25	2
	cubierto de vegetación	670	10 a 30	1.4

Puede observarse que además de lo difícil que resulta encuadrar al suelo en cuestión en los tipos mencionados en la tabla, las variaciones en  $f_c$  son tan grandes que es muy probable cometer errores de consideración al escoger algún valor.

Kostiakov en 1932 propuso la fórmula:

$$f_p = c * n * t^{-1} \quad (2.12)$$

Donde  $c$  y  $n$  son constantes empíricas. Hasta ahora no se han hecho intentos por correlacionar los valores de  $c$  y  $n$  con las características del suelo, humedad antecedente, etc. Sin embargo, desde un punto de vista teórico,  $n$  tendría que estar en un rango entre cero y uno para que la función sea decreciente en el tiempo.

Philip, en 1957, después de un elaborado desarrollo matemático, concluye que la relación entre la infiltración y el tiempo está dada por la serie:

$$f = \frac{1}{2} * S * t^{-1/2} + (A_2 + K_i) + \frac{3}{2} * A_3 t^{1/2} + 2 * A_4 * t + \dots \quad (2.13)$$

Donde  $A_2, A_3, A_4 \dots$  son constantes empíricas,  $K_i$  es la conductividad hidráulica del suelo en las condiciones de humedad iniciales y  $S$  es un término llamado "sortividad", constante durante un evento dado, que representa la influencia de la capilaridad en el proceso. Este autor propone que, para fines de hidrología aplicada, se usen únicamente los dos primeros términos de la ecuación 2.13:

$$f = \frac{1}{2} * S * t^{-1/2} + A \quad (2.14)$$

Donde  $A = A_2 + k_i$ , la infiltración acumulada es:

$$F = \int_0^t f * dt = S * t^{1/2} + A * t \quad (2.15)$$

## 2.4 Relación río-acuífero

---

### 2.4.1 Descripción de la relación río-acuífero

---

Las corrientes superficiales interactúan con las aguas subterráneas en diferentes lugares a través de paisajes montañosos, glaciares, kársticos, fluviales y costeros. La interacción toma lugar de tres formas básicas: las corrientes pueden ganar agua desde el acuífero a través del lecho del río, pierden agua hacia el acuífero a través del lecho del río, o pueden hacer ambas cosas, ganar en algunos tramos y perder en otros (Winter et al., 1998). Para que se produzca una descarga de agua subterránea en una corriente, la posición del nivel de agua en el acuífero debe ser mayor que el nivel del río. Por el contrario, para que la corriente drene hacia el acuífero, la elevación del nivel del agua en el acuífero debe ser menor que la altura de la superficie del agua en el río.

Las corrientes perdedoras pueden estar conectadas al sistema de agua subterránea por una zona saturada continua, o bien pueden estar desconectadas del sistema de agua subterránea por una zona no saturada. Cuando la corriente esta desconectada del sistema de agua subterránea por una zona no saturada, el nivel freático podría tener un montículo por debajo de la corriente si la tasa de recarga a través del lecho del río y la zona no saturada es mayor que la tasa de flujo lateral de agua subterránea fuera del montículo del nivel freático. Una característica importante de las corrientes que están desconectadas del acuífero es que el bombeo de agua subterránea cerca del cauce no afecta el flujo del río.



Ilustración 8. Esquema conceptual en un sistema río-acuífero de corrientes ganadoras

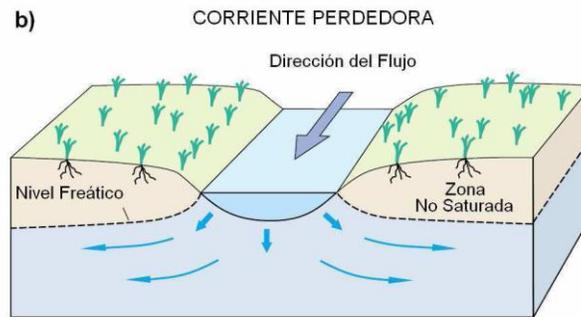


Ilustración 9. Esquema conceptual en un sistema río-acuífero de corrientes perdedoras

Otro tipo de interacción entre aguas subterráneas y corrientes superficiales está dada por el rápido incremento en los niveles del río, lo cual causa que el agua se mueva desde el canal hacia las bancas. El agua superficial se infiltra en un acuífero hidráulicamente conectado durante un aumento del nivel en el río, y posteriormente, su marcha atrás durante la recesión de caudales recarga la corriente; el volumen de agua que es almacenado y liberado después de la inundación es conocido como almacenamiento de banca (Bank Storage). Este proceso usualmente es causado por tormentas, deshielos, o por la descarga de un embalse aguas arriba. El almacenamiento de banca puede atenuar considerablemente la onda de crecida, disminuye el pico de descarga, extiende el tiempo base de la hidrógrafa y recarga el acuífero. La magnitud de las tasas de infiltración y los volúmenes de agua almacenada dependen de varios parámetros geológicos e hidrológicos del sistema río-acuífero, así como de la transmisividad y capacidad de almacenamiento del acuífero.

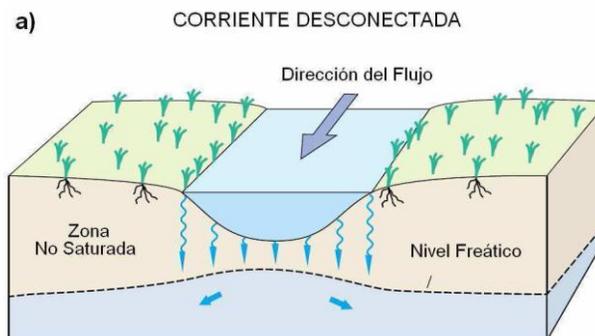
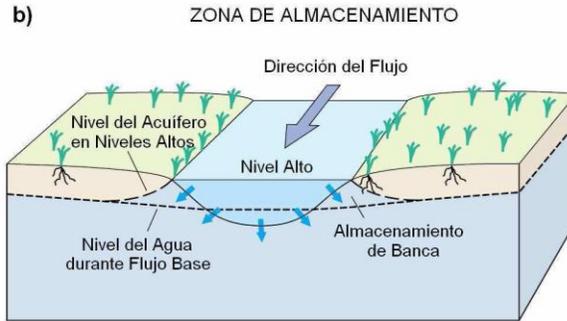


Ilustración 10. Corriente desconectada del sistema de agua subterránea por una zona no-saturada



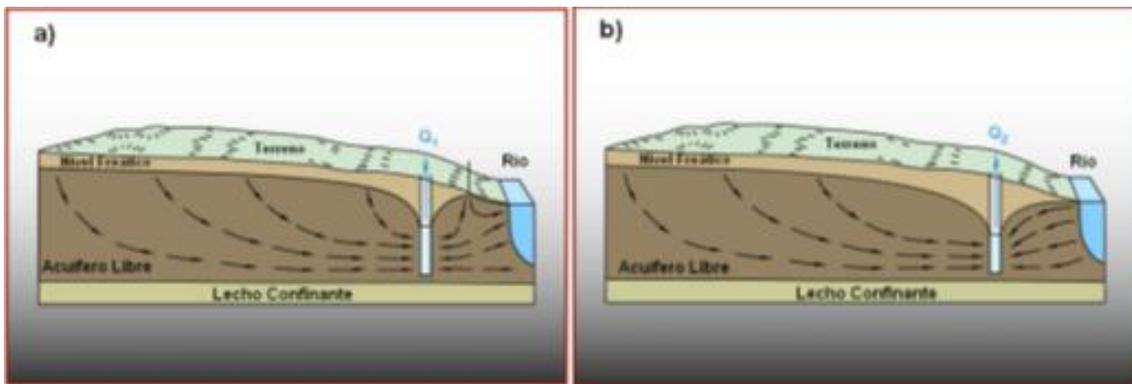
**Ilustración 11. Zona de almacenamiento en la interfaz río-acuífero**

Si el aumento del nivel del río es suficiente para sobrepasar las bancas y alcanzar grandes zonas de inundación en la llanura aluvial, puede presentarse una recarga generalizada en toda la zona inundada. En este caso, el tiempo que tarda la recarga por inundación para regresar a la corriente debido al flujo de agua subterránea puede ser del orden de semanas, meses o años, debido a que las longitudes de las rutas que debe tomar el agua subterránea para este caso, son mucho mayores que aquellas resultantes del almacenamiento de banca local.

En algunos tramos de ríos, el agua liberada al río de las zonas de almacenamiento excede la descarga de agua subterránea bajo condiciones de flujo base. Así, la descarga y recarga sucesiva del acuífero tiene un efecto memoria en el régimen de escorrentía de los ríos. Además del almacenamiento de banca, otros procesos podrían afectar el intercambio local de agua entre ríos y acuíferos someros adyacentes.

Los cambios en los caudales del río entre condiciones ganadoras y perdedoras pueden ser causados también por el bombeo de agua subterránea cerca de las corrientes. La captación de aguas subterráneas en acuíferos que están directamente conectados a cuerpos de agua superficiales tiene un efecto significativo sobre la dinámica del agua en el sistema. Los efectos del bombeo de un pozo individual o un pequeño grupo de pozos sobre el régimen hidrológico, son de escala local. Sin embargo, los efectos de muchos pozos explotando un acuífero con altas tasas de bombeo, podría tener impactos a escala regional. Además, los cambios en la dirección del flujo en el sistema de aguas superficiales y subterráneas puede afectar el transporte de contaminantes por advección. Esta situación aplica para todos los cuerpos de agua superficial, incluidos lagos y humedales.

Un sistema de agua subterránea bajo condiciones previas de explotación se encuentra en un estado de equilibrio dinámico, donde la recarga es igual a la descarga de agua subterránea a la corriente. Si se instala un pozo y bombea continuamente a una tasa  $Q_1$ , se alcanza un nuevo estado de equilibrio dinámico, donde el flujo de entrada al sistema de agua subterránea por recarga será igual a la descarga hacia el río más la captación del pozo. En este nuevo equilibrio, una parte del agua subterránea que hubiera sido descargada a la corriente es interceptada por el pozo, y se establece localmente una divisoria de aguas subterránea entre el pozo y el río, la cual es una línea que separa las direcciones de flujo. Si el pozo bombea a una tasa  $Q_2$  mucho mayor, después de cierto tiempo se alcanza un nuevo estado de equilibrio. Para esta condición, la divisoria de agua subterránea entre el pozo y el río desaparece, y el bombeo de agua subterránea induce el movimiento del agua del río hacia el acuífero. De esta forma, el bombeo reversa la condición hidrológica de la corriente en ese tramo, pasando de recibir la descarga del agua subterránea a recargar el acuífero.



**Ilustración 12. a) Bombeo cerca del cauce intercepta parte del agua subterránea que descarga en el río y b) Tasas mayores de bombeo cerca del río inducen recarga del acuífero**

El planteamiento anterior para un acuífero que es explotado cerca de un río es una conceptualización de que el agua superficial y el agua subterránea son el mismo recurso. En el largo plazo, la cantidad de agua subterránea explotada es aproximadamente igual a la reducción del caudal en el río, el cual potencialmente debería estar disponible para usuarios aguas abajo.

El intercambio hidrológico de aguas superficiales y subterráneas, a escalas mayores en un paisaje está controlado principalmente por: la distribución y magnitud de las conductividades hidráulicas dentro del canal y los sedimentos asociados de la llanura aluvial; la relación del nivel del río con el nivel del acuífero adyacente; y la geometría y posición del canal del río dentro de la llanura aluvial.

La dirección de los procesos de intercambio varía con la carga hidráulica, mientras la magnitud de los caudales depende de la conductividad hidráulica de los sedimentos. Los eventos de precipitación y los patrones estacionales alteran la carga hidráulica, y de esta forma inducen cambios en la dirección del flujo. Se pueden distinguir dos direcciones netas del flujo en el sistema: la condición de influencia, donde el agua superficial contribuye con el flujo subsuperficial; y la condición de efluente, donde el agua subterránea drena hacia la corriente. Por otro lado, cuando se tienen regímenes variables de flujo se puede alterar la conductividad hidráulica de los sedimentos debido a procesos de erosión y deposición, y por lo tanto esto afecta directamente la intensidad de la interacción de aguas superficiales y subterráneas.

Bajo condiciones de baja precipitación, el flujo base en muchas corrientes constituye la descarga para la mayoría del año. En contraste, bajo condiciones de alta precipitación, la escorrentía superficial y el inter-flujo se incrementan gradualmente, generando presiones hidráulicas más altas en tramos bajos de las corrientes, lo cual permite al río cambiar de condición efluente a influente, infiltrando sus bancas y recargando el acuífero.

#### 2.4.2 Metodología de cálculo clásica

Para sistemas río-acuífero hidráulicamente conectados el intercambio de flujo resultante es una función de la diferencia entre el nivel del río y la carga del acuífero adyacente. Un enfoque práctico y que ha sido ampliamente utilizado para estimar la transferencia de caudales entre ambos sistemas es considerar que el flujo entre el río y el acuífero es controlado por un mecanismo de filtración a través de un estrato semipermeable en una dimensión. Este mecanismo, basado en la Ley de Darcy, donde el flujo es una función directa de la conductividad hidráulica y la diferencia de carga, puede ser expresado como:

$$q = C_{riv} * (h_r - h_a) \quad (2.16)$$

Donde:

$q$ ; Es el flujo entre el río y el acuífero. Positivo para descarga del río hacia el acuífero y negativo en sentido inverso

$h_r$ ; Es el nivel del río

$h_a$ ; Carga en el acuífero

$C_{riv}$ ; Conductividad hidráulica de la capa conexión entre el río y el acuífero definida como:

$$C_{riv} = \frac{K_{riv} * L_{riv} * W}{M} \quad (2.17)$$

Donde:

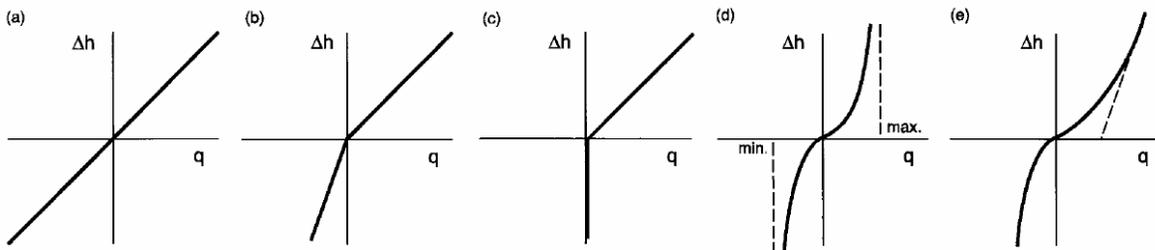
$K_{riv}$ ; Conductividad hidráulica de los sedimentos del lecho

$L_{riv}$ ; Longitud de la corriente

$W$ ; Ancho del río

$M$ ; Espesor del material del lecho del río

En la siguiente figura se presentan algunos mecanismos que describen el flujo entre río-acuífero ( $q$ ) como una función de la diferencia entre la carga del río y el acuífero  $\Delta h = h_r - h_a$ . La Figura a implica que los mecanismos de flujo del río al acuífero (descarga río-acuífero) y del acuífero al río (flujo base) son siempre los mismos, aunque en la práctica, los mecanismos que representan estos procesos pueden ser diferentes. La Figura b muestra la situación donde la tasa de flujo desde el río hacia el acuífero es más lenta que la tasa de flujo del acuífero hacia el río, y la Figura c muestra la situación donde no puede ocurrir flujo desde el río hacia el acuífero.



**Ilustración 13. Mecanismos que describen el intercambio de flujo entre el río y el acuífero**

Para algunos autores la hipótesis de una relación lineal entre  $q$  y  $\Delta h$  es muy simple, y en varios trabajos han concluido por ejemplo, que la descarga total (flujo base) durante el periodo de recesión de caudales en el río, es en gran medida independiente del coeficiente de goteo  $C_{riv}$ . También, que cuando se tiene una recarga muy alta, el goteo calculado con la ecuación 2.16 es mucho mayor que el caudal que podría ocurrir en la práctica, y no tiene en cuenta el aumento de la resistencia al paso del agua cuando su volumen aumenta. Así, Rushton y Tomlinson proponen que una relación no lineal representada en la figura anterior por el inciso d podría entregar una solución más apropiada de ese aumento de resistencia en flujos altos, a partir de la siguiente expresión:

$$q = C_1 * (1 - e^{-C_2 * \Delta h}) \quad (2.18)$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes. Esta relación permite un rápido incremento en el flujo para pequeños cambios de carga, pero sugiere unos flujos máximos que no pueden ser excedidos, siempre y cuando la diferencia de carga se vuelva más grande.

En caso de que la propuesta de que existe una tasa máxima de flujo no sea aceptable, Rushton y Tomlinson proponen la combinación de una relación lineal y no lineal, a partir de la siguiente expresión:

$$q = C_1 * \Delta h + C_2 * (1 - e^{-C_3 * \Delta h}) \quad (2.19)$$

Donde  $C_1$ ,  $C_2$ , y  $C_3$  son constantes. Esta relación se presenta en la Figura 2-4e. Debido a que el término exponencial es relativamente grande para pequeños valores de  $\Delta h$ , la relación no lineal domina para pequeñas diferencias de carga, mientras la relación lineal adquiere importancia para grandes diferencias de carga.

## 2.5 Balance hídrico

### 2.5.1 Definición

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido por nosotros como ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de ambos aspectos, almacenamientos y flujos del agua; sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para el cálculo del balance.

$$Estado_{t+1} = Estado_t + \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^M Salidas_j \quad (2.20)$$

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación ( $P$ ), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera ( $Q_{sl}$ ,  $Q_{ul}$ ). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua ( $E$ ) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada ( $Q_{so}$ ,  $Q_{uo}$ ). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada ( $\Delta s$ ) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia ( $v$ ).

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo estará representado por la siguiente ecuación:

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta s - v = 0 \quad (2.21)$$

## 2.5.2 almacenamiento superficial

---

El agua almacenada sobre la superficie de la cuenca está compuesta de:

- 1) Agua de lluvia, detenida en las micro-depresiones.
- 2) Agua en estado sólido (cubierta o capa de nieve, campos de hielo, glaciares).
- 3) Agua de la red hidrográfica, cauces de los ríos, lagos, embalses, pantanos)

El agua almacenada en las micro-depresiones (charcos y fangales después de lluvias y chubascos) no dura mucho, resulta entonces difícil tenerla en cuenta y medirla con exactitud. Esta agua se pierde rápidamente por evaporación y por infiltración dentro del suelo, por lo cual, deberá tenerse en cuenta por otros términos adicionales en la ecuación del balance hídrico.

Las variaciones del agua almacenada en forma de capa de nieve se evalúan mediante inspecciones regulares de las zonas nevadas, tan frecuentes como sea posible, a lo largo de rutas especiales que cubren la cuenca del río y tienen en cuenta la configuración del terreno.

La acumulación de agua en lagos y embalses depende de su capacidad, de la superficie de los lagos en la cuenca y de la amplitud de las fluctuaciones del nivel del agua durante el balance hídrico.

El agua almacenada en los lagos debe tenerse en cuenta si hay más de 2 ó 3% de superficie de lagos en la cuenca total. Para calcular las variaciones del agua almacenada en lagos y embalses se utilizan curvas que relacionan el agua almacenada en el lago con el nivel medio del agua.

Para calcular la variación del volumen de agua, en un lago ó embalse, se determina el nivel medio del agua a partir de los datos obtenidos. El nivel medio en lagos no profundos y en grandes embalses se obtiene directamente por las lecturas de un medidor de niveles afectado lo menos posible por el viento. El nivel medio del agua embalsada se determina separadamente, para secciones con diferentes taludes de la superficie del agua. El nivel medio del agua en lagos profundos se calcula como media ponderada de las lecturas de todos los medidores utilizados en la operación. La variación del agua almacenada durante el balance la determinamos por diferencia entre el volumen de agua al principio y al final del mismo.

Para embalses con distinto talud se utilizan, para cada sección, curvas diferentes de elevaciones capacidades, es decir, el volumen de agua se determina, por secciones separadas, por la media aritmética del nivel del agua, obtenido por lecturas en los medidores instalados en la sección dada. Si hay varios lagos o embalses en la cuenca del río, el incremento de agua almacenada se calcula para cada lago o embalse por separado.

Para todas las masas de agua, y especialmente para los embalses y lagos, donde las fluctuaciones del nivel del agua dan como resultado grandes variaciones en la superficie, el nivel medio del agua se puede determinar con exactitud, sólo si hay una eficaz coordinación de alturas en todos los instrumentos registradores. En la URSS la nivelación es muy utilizada para coordinar los datos en los instrumentos registradores. Este método ayuda a evitar los errores en las lecturas de los instrumentos medidores y facilita el establecimiento de un dato: el "cero común", en todos los instrumentos que operan sobre el nivel del agua.

### 2.5.3 Almacenamiento de agua subterránea

En el cálculo del balance hídrico de la cuenca de un río, las variaciones en el nivel piezométrico del acuífero ( $\Delta G$ ) se determinan a partir de los datos de campo recogidos en puntos de observación, generalmente pozos, y de los valores del coeficiente  $v$ . En el caso de descenso de los niveles del agua subterránea,  $v$  representa la porosidad eficaz  $v_{sz}$  y en el caso de elevación de los niveles representa el déficit de saturación  $v_{uz}$  del subsuelo y suelo por encima de la zona de capilaridad. El cálculo de la variación del agua subterránea almacenada se realiza por separado, según se trate de períodos de descenso o de elevación de los niveles piezométricos.

Para un cálculo aproximado, las variaciones del agua subterránea almacenada se pueden evaluar para cualquier período de tiempo, suponiendo que el déficit de saturación es igual a la porosidad eficaz o coeficiente de almacenamiento.

Las variaciones del agua subterránea almacenada en una zona homogénea se calculan por:

$$\Delta G = v * \Delta \bar{h} \quad (2.22)$$

Donde  $\Delta \bar{h}$  es la variación media del nivel piezométrico en la zona.

Las variaciones del nivel piezométrico en una cuenca, para un determinado período, se determinan calculando la diferencia entre los niveles medios al comienzo y al final del período considerado. Los niveles piezométricos del agua subterránea se miden en pozos o piezómetros, teniendo en cuenta la topografía y las estructuras geológicas de los acuíferos. En cuencas con condiciones hidrogeológicas homogéneas el nivel medio se calcula como media aritmética, mientras que en cuencas con condiciones heterogéneas se calcula como media ponderada. En estas cuencas puede haber considerables variaciones locales en el nivel piezométrico, aumentando el almacenamiento de aguas subterráneas en algunas partes y descendiendo en otras. Estas diferencias no se tienen en cuenta se utiliza el valor medio de las variaciones del nivel piezométrico del agua subterránea para la totalidad de la cuenca. Las variaciones del agua subterránea almacenada se deben determinar para cada estructura que constituya la cuenca.

Para evaluar las fluctuaciones del agua subterránea originadas por factores meteorológicos, los coeficientes de correlación entre los niveles del agua en los pozos se calculan para pozos situados a diferentes distancias unos de otros. Esto permite la determinación del grado de sincronización de las fluctuaciones del nivel en las cuencas, para las cuales se calculan las variaciones de almacenamiento, así como también la representatividad de los puntos de observación para diferentes zonas de la cuenca. Este análisis regional de los datos de observación hidrogeológicos permite una evaluación más objetiva de los cambios generales del nivel en los puntos de observación elegidos.

El déficit de saturación  $v_{uz}$  se calcula, a partir de los datos de campo, como la diferencia entre la capacidad de humedad total y la humedad natural de los materiales en la zona de fluctuaciones del agua subterránea. La porosidad eficaz o coeficiente de almacenamiento  $v_{sz}$  es el volumen de agua extraíble de una muestra permeable saturada con respecto al volumen total de la muestra. Estos valores se determinan midiendo el contenido de humedad de las muestras de los materiales tomados encima del nivel piezométrico del agua subterránea. Cuando se calcula la porosidad eficaz  $v_{sz}$  se debería tener en cuenta que hasta los materiales completamente saturados pueden contener aire retenido, que puede llegar a ser del 4 al 10% o más con respecto a la porosidad del material.

Cuando el material, en la zona de fluctuaciones, está estratificado,  $v$  se calcula como un valor medio ponderado mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{\Delta h} * \sum_{i=1}^n v_i * d_i \quad (2.23)$$

Donde  $v$  es la porosidad eficaz de una capa cualquiera de material de grosor  $d_i$ ,  $\Delta h$  es la variación del nivel de agua correspondiente al grosor de la capa.

Para una cuenca de un río o para una región grande con condiciones hidrogeológicas heterogéneas, las variaciones del agua subterránea se estiman dividiendo la región en subregiones relativamente homogéneas, calculando la variación del almacenamiento en cada subregión, y sumando todas las variaciones de almacenamiento subregionales.

#### 2.5.4 Balance hídrico de una cuenca

El cálculo del balance hídrico en cuencas fluviales es siempre el principal objetivo. A partir del balance en cuencas de ríos de primer orden se calculan los balances hídricos generales y se evalúan los recursos de agua para diferentes países, regiones y continentes.

En la ecuación del balance hídrico todos los elementos del balance son valores medios de la cuenca.

Para calcular el balance hídrico de una cuenca de un gran río con diferentes características fisiográficas, la cuenca debe dividirse en un número adecuado de zonas (subcuencas), para cada una de las cuales se realiza el cálculo del balance hídrico.

El balance hídrico total de la cuenca se calcula a partir de los valores medios ponderados de los principales componentes del balance hídrico de las subcuencas.

El cálculo de balances hídricos medios de cuencas fluviales para un ciclo anual completo, es la forma frecuente de calcular el balance hídrico, proporciona información inicial sobre los recursos de agua de la cuenca. La ecuación del balance hídrico de una cuenca cerrada de un río, para un período de tiempo largo, se puede expresar así:

$$P - Q - E = 0 \quad (2.24)$$

Donde  $P$  es la precipitación media anual,  $Q$  el caudal medio anual y  $E$  la evaporación en la cuenca.

En algunas cuencas con intercambio notable de aguas subterráneas con las cuencas adyacentes, los términos  $Q_{ul}$  y  $Q_{uo}$  de entrada y salida de aguas subterráneas deben tenerse en cuenta en la ecuación (2.24). El intercambio de aguas subterráneas se puede evaluar por medio de observaciones especiales.

Cuando no existe un significativo intercambio de aguas subterráneas con las cuencas adyacentes o con el mar, el valor de la evaporación media anual en la cuenca es válido si se obtiene utilizando la ecuación (2.24).

Ha sido utilizada una ecuación del balance hídrico para un largo período, en la cual, el caudal total  $Q$  se descompone en caudal superficial  $Q_s$  y en el flujo subterráneo dentro de los ríos  $Q'_u$ , de esta forma la expresión (2.24) queda expresada como:

$$P - Q_s - Q'_u - E = 0 \quad (2.25)$$

Partiendo de esta ecuación es posible definir:

$$N = P - Q_s = Q'_u + E; K_U = \frac{Q'_u}{N}; K_E = \frac{E}{N} \quad (2.26)$$

Donde  $N$  es la infiltración total (humedad total);  $K_U$  es el coeficiente de escorrentía debido al agua subterránea, y representa la proporción de infiltración anual que origina el flujo subterráneo en el río;  $K_E$  es el coeficiente de evaporación.

La ecuación general del balance hídrico se transforma, según las características específicas de la masa de agua estudiada y según la duración del periodo del balance.

### 3. Revisión de software actual para el apoyo en la modelación de recursos hídricos

---

#### 3.1 Clasificación de modelos actuales

---

Un modelo matemático debe permitir la representación del fenómeno en el sistema real a un plano abstracto y después permite la reinterpretar en la realidad las predicciones del modelo.

La clasificación del modelo puede realizarse según su información de entrada, el tipo de representación, su aleatoriedad o según su aplicación.

##### 3.1.1 Según su información de entrada

---

De acuerdo con el tipo de fuentes de la información de entrada.

Modelos empíricos. Son los que utilizan la información de observaciones directas o los resultados de experimentos.

Modelos heurísticos. Son los que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno en estudio.

##### 3.1.2 Según el tipo de representación

---

Una clasificación es dependiendo si se pretenden hacer predicciones de tipo cualitativo o se pretende cuantificar aspectos del sistema que se está modelado.

Modelos cualitativos o conceptuales. Estos pueden usar figuras, gráficos o descripciones causales, en general se limitan con predecir si el estado del sistema irá en determinada dirección o si aumentará o disminuirá alguna magnitud, sin importar exactamente la magnitud concreta de la mayoría de aspectos.

Modelos cuantitativos o numéricos. Usan números para representar aspectos del sistema modelado, y generalmente incluyen fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos que relacionan los valores numéricos. El cálculo con los mismos permite representar el proceso físico o los cambios cuantitativos del sistema modelado.

### 3.1.3 Según la aleatoriedad

---

Otra clasificación según si a una entrada o situación inicial concreta pueden corresponder o no diversas salidas o resultados.

Modelos deterministas. Se conoce de manera puntual la forma del resultado ya que no hay incertidumbre. Además, los datos utilizados para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.

Modelos estocásticos. Probabilístico, que no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

### 3.1.4 Según su aplicación

---

De acuerdo con el uso último del modelo, relacionado directamente con el tipo de resultados que arrojará.

Modelo de simulación o descriptivo. De situaciones medibles de manera precisa o aleatoria, por ejemplo con aspectos de programación lineal cuando es de manera precisa, y probabilística o heurística cuando es aleatorio. Este tipo de modelos pretende predecir qué sucede en una situación concreta dada.

Modelo de optimización. Para determinar el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción, o cualquier otra situación. Cuando la optimización es entera o no lineal, combinada, se refiere a modelos matemáticos poco predecibles, pero que pueden acoplarse a alguna alternativa existente y aproximada en su cuantificación. Este tipo de modelos requiere comparar diversas condiciones, casos o posibles valores de un parámetro y ver cuál de ellos resulta óptimo según el criterio elegido.

Modelo de control. Para saber con precisión como está algo en una organización, investigación, área de operación, etc. Este modelo pretende ayudar a decidir qué nuevas medidas, variables o qué parámetros deben ajustarse para lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.

## 3.2 Ventajas y desventajas de modelos comunes

---

### 3.2.1 Modelo HEC-RAS

---

Descripción. Modelo de dominio público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interface gráfica de usuario que facilita las labores de pre proceso y pos proceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

El procedimiento básico computacional de HEC-RAS para el flujo estable está basado en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía son evaluadas por la fricción y la contracción / la extensión. La ecuación de momentum puede ser usada en situaciones donde el perfil superficial de agua es rápidamente variado. Estas situaciones incluyen saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en uniones del río.

Para el flujo inestable, HEC-RAS soluciona la ecuación, dinámica, de Saint-Venant que usa un método de diferencias finitas implícito.

HEC-RAS está equipado para modelar una red de canales, un sistema dendrítico o solo un alcance del río. Ciertas simplificaciones deben ser hechas para modelar algunas situaciones de flujo complejas.

Características técnicas y sus aplicaciones. HEC-RAS es un programa de computadora para modelar el agua que fluye por los sistemas de canales abiertos y calcular perfiles superficiales de agua. HEC-RAS encuentra el uso particular en el manejo de llanuras de inundación y estudios de seguridad de inundaciones para evaluar el crecimiento de las llanuras de inundación. Algunos empleos adicionales son: análisis y diseño de puentes y alcantarilla, estudios de diques y estudios de modificación de canal.

Características técnicas:

- Cálculo hidráulico de estructuras (puentes, aliviaderos, alcantarillas, etc.).
- Visualización gráfica de datos y resultados.
- Edición gráfica de secciones.
- Ejecutable en entorno Microsoft Windows.

Aplicaciones:

- Modelación hidráulica en régimen permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales.

Limitaciones del programa Hec-Ras en flujo permanente

- El flujo debe de ser permanente.
- El flujo es gradualmente variado y en lugares donde sea flujo rápidamente variado se usa la ecuación de momentum u otras ecuaciones empíricas.
- El flujo se considera unidimensional.
- El cauce del RN debe de tener una pendiente pequeña menos de 1:10

### 3.2.2 Modelo MIKE SHE

Descripción. Es un paquete de herramientas de modelación, en su mayoría compatibles con bases de datos GIS, que simulan el comportamiento hidrológico de una cuenca y permite perfectamente la simulación de políticas de operación para predecir los impactos dentro de la cuenca, Mike She hace uso del método de diferencias finitas para obtener la solución de las ecuaciones.

Mike She utiliza Mike 11 para modelar el flujo en canales, Mike 11 contiene módulos capaces de calcular redes complejas de canales, ríos y embalses ó estructuras sobre ríos como compuertas, vertederos, puentes. Mike She es capaz de crear una interface con el modelo MOUSE swever model, con el que se puede simular la interacción entre el drenaje sanitario y pluvial en zonas urbanas además de ser capaz de simular cuencas de hasta 80 000 km<sup>2</sup>.

Mike She recibe datos en diferentes formatos entre los que se encuentran los archivos .shp, formatos de malla DHI, la información de entrada puede tener cualquier formato de malla.

Los resultados de este modelo se pueden exportar a diferentes lenguajes de programación, así como directamente a hojas de excel, la pantalla muestra una interface amigable entre el usuario y el modulo de resultados para poder identificar rápidamente el grafico deseado.

#### Características técnicas

- Permite programación de condiciones lógicas entre cada time step.
- Simulación de áreas de inundación y mapas de riesgo.
- Calculo de estructuras sobre ríos.
- Visualización gráfica de datos y resultados.
- Edición gráfica de secciones.
- Ejecutable en entorno Microsoft Windows.

#### Aplicaciones

- Modelación conjunta de cuencas hidrológicas completas.
- Realiza balances hidráulicos en el área de estudio.
- Simula tránsitos en ríos.

#### Desventajas

- La modelación se puede volver muy compleja ya que es fácil perder de vista el objetivo del modelo al encontrar una interfaz tan sencilla.
- El desarrollo de modelos complejos requiere la definición de muchos parámetros.

### 3.2.3 WEPP (Water Erosion Prediction Project)

---

Descripción. El desarrollo del modelo WEPP Water Erosion Prediction Project, dio inicio en 1985 para obtener una nueva técnica predictiva a favor de los planes de conservación de suelos y aguas. Se basa en procesos físicos de hidrología y erosión para predecir erosión hídrica. Se diferencia de la USLE en los datos que requiere y en el origen, puesto que esta última se basa en parámetros obtenidos empíricamente. Tiene dos aplicaciones principales: en laderas y en cuencas.

El modelo WEPP se usa para proyectar la pérdida de suelo, la producción y pérdida de sedimentos en laderas a partir de un flujo superficial, pérdida de suelo y producción de sedimentos a partir de flujos en canales y acumulación de sedimentos en embalses.

Este modelo tiene la capacidad de simular la distribución espacial y temporal de la pérdida de suelo para una ladera completa o cada punto de ella. Los procesos considerados en la simulación de erosión de ladera incluyen erosión de surco, deposito y transporte de sedimentos, infiltración, sellado superficial, hidráulica de surco, escorrentía superficial, crecimiento de la planta, descomposición de residuos, percolación, transpiración, fusión de nieves, efecto de la heladas sobre la infiltración y erosión del suelo, clima y efecto de la labranza sobre el suelo, incluyendo las consecuencias del desborde de los camellones.

El componente de generación climática es similar al utilizado por EPIC y SWRRB. Se incluyo un modelo de generación de intensidad de las lluvias que se emplea para calcular la precipitación excedente, como parte del cálculo del escurrimiento.

Para el cálculo de la escorrentía superficial se recurre a la solución analítica de las ecuaciones de onda cinemática y a un método aproximativo, basado en regresiones sobre diversas condiciones de rugosidad del suelo, pendiente y clima. Un grupo de ecuaciones de regresión genera el caudal pico y otro a la duración del escurrimiento.

Los componentes de balance hídrico y de percolación se basan en los empleados en SWRRB, con algunas modificaciones para mejorar la estimación de parámetros de percolación y evaporación.

El componente de crecimiento de las plantas simula condiciones de cultivos o de pasturas. Su objeto es simular los cambios temporales en las plantas que afectan al escurrimiento y la erosión. El modelo de cultivos se basa en el componente EPIC y acepta diversos arreglos culturales, como la rotación y asociación de cultivos. El modelo de pasturas calcula el crecimiento de las plantas de la comunidad utilizando una curva de crecimiento potencial, la cual se obtuvo de una modificación de la función de densidad de Poisson.

#### Características técnicas.

El modelo opera en periodos de tiempo de 24 horas, calculando las condiciones del suelo y vegetación en eventos de lluvia, luego utiliza esta información para predecir la hidrología y erosión a partir de eventos individuales. El modelo, que intenta remplazar la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), cuenta con varias características a su favor: tiene capacidad de representar geometrías complejas de las pendientes así como suelos no uniformes y el cultivo y prácticas de manejo en suelos ladera

Para comenzar con el modelo el programa pide cuatro archivos; Archivo de pendiente, Archivo de clima, Archivo de suelo y Archivo de manejo de cultivo. El archivo de entrada por pendiente se basa en la orientación de la pendiente, longitud y grado de inclinación en sitios del perfil, el usuario puede simular diferencias en el manejo y tipo de suelo a lo largo de la longitud de la ladera mediante el uso de elementos de flujo superficial (UFO), un UFO es una sección específica de la ladera con manejo y suelo homogéneos. El archivo de suelo requiere información de las características físicas de la superficie del suelo y de cada una de las capas sub superficiales tales como arcilla, arena, materia orgánica, contenido de fragmentos rocosos y capacidad de intercambio catiónico, requiere también información sobre el albedo, la fracción de radiación solar reflejada a la atmosfera, el nivel inicial de saturación, el porcentaje de porosidad llenada por agua y algunos parámetros de erosión. El archivo de cosecha y manejo se basa en la información acerca de parámetros de plantas y sus características, practicas de cultivo, manejo de plantas y residuos, drenaje sub superficial y rotación de cultivo.

El archivo de clima se puede introducir en formato CLIGEN (climate generator) o BPCDG (breakpoint climate data generator), El CLIGEN requiere de datos estadísticos mensuales de largo alcance, para generar una secuencia diaria de datos meteorológicos simulados para el periodo de años que se requiera; incluyendo medias, desviaciones estándar y coeficientes de asimetría de la precipitación, probabilidades de un día húmedo seguido de un día húmedo, temperaturas medias máximas y mínimas del aire, radiación solar y dirección y velocidad del viento. El BPCDG es un programa independiente que ayuda a crear puntos de ruptura de datos climáticos a partir de aforos estándar de lluvia y de conjuntos de datos climáticos provenientes de cualquier estación meteorológica, es una buena opción cuando no se cuenta con registros históricos del clima.

## Aplicaciones

- Modela la erosión entre canalillos.
- Calcula el esfuerzo hidráulico cortante en el fondo del canal.
- Modela la erosión en estructuras hidráulicas.

## Desventajas

- Modelo enfocado a la conservación de suelos.
- No hace tránsito hidráulico del recurso a través de la zona.

### 3.2.4 Modelo SIMGES (Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos)

---

Descripción. El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial.

El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de sonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías.

Características técnicas. La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volumen objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

El "esquema del usuario" confeccionado en la manera arriba esbozada constituye una red de flujo. Pero dicha red no cumple el requisito de ser conservativa, pues no es cerrada y hay nudos en los que hay almacenamiento (los correspondientes a los embalses). Por tanto, la primera tarea del modelo después de la lectura de datos es la adaptación del esquema del usuario como una red de flujo conservativa. Para ello es necesario, por una parte, el establecimiento de unos nudos de "cierre" de la red, y por otra, el desdoblamiento de cada elemento tipo en un sub esquema de arcos y nudos tal que aseguren que la simulación del comportamiento hidráulico y de gestión del elemento es adecuada. El resultado es una "red de flujo interna", mucho más compleja que la del usuario, que ya es conservativa, y que es la que manejará el modelo sin trascendencia exterior al usuario.

Una vez confeccionada dicha red interna, se entra en la dinámica de la simulación, en la que para cada mes del período de simulación se resuelve la red de flujo con los valores de aportaciones, demandas, y parámetros de gestión correspondientes a ese mes, se simulan los acuíferos, se itera entre estos dos últimos pasos (debido a las no linealidades y a las relaciones río-acuífero), y se almacenan valores para su escritura anual y estadísticas. Finalmente, una vez terminado el periodo de simulación, se procede a la confección de estadísticas, y cálculos de garantías.

Aplicaciones.

- Análisis de las dotaciones que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.

- Análisis de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de dotación.
- Análisis de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Análisis de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de dotación dados

Desventajas.

- Modelo relativamente viejo.
- Programado especialmente para España.
- Periodos de tiempo fijos mensuales.

### 3.2.5 CEQUEAU

---

Descripción. CEQUEAU es un modelo distribuido para el balance de agua desarrollado por el INRA-ETE (Institut National de la Recherche Scientifique, Eau, Terre et Environnement). Este modelo toma en cuenta las características fisiográficas de la cuenca, mediante una discretización espacial. Esta discretización es con base en una malla de cuadros que permite representar la evolución espacio temporal del fenómeno. El modelo ha sido implementado en cuencas de Canadá en la evaluación de los recursos hídricos con fines de generación eléctrica, fue aplicado en la simulación de avenidas en cuencas de la red hidrográfica del país.

El modelo CEQUEAU está diseñado para obtener la información fisiográfica de la cuenca en estudio, a partir de cartas topográficas. Este proceso requiere de una inversión de horas hombre considerable.

El centro de Recursos Idrisi desarrollo una interfaz Hidrogeomática con el modelo CEQUEAU (Idrisi-CEQUEAU), el cual permite obtener de una forma rápida y segura, la extracción de la información que requiere el modelo CEQUEAU para llevar a cabo la modelación hidrológica de una cuenca. El módulo hidrogeomático permite seleccionar la esquina inferior izquierda u origen de la malla, el tamaño de cuadro (éste debe ser múltiplo de la resolución del MNA), la coordenada inicial I, J del primer cuadro CEQUEAU que discretiza la cuenca, así como el número de columnas y líneas que formarán la malla de cuadros. Es importante realizar una adecuada selección de los parámetros de la malla que discretiza la cuenca en estudio.

#### Características técnicas.

El modelo toma en cuenta la variabilidad espacial de las características físicas de la cuenca subdividiéndola en áreas representativas elementales llamadas “whole squares”. Para cada una de estas el modelo analiza: su altitud, su pendiente media, la orientación de la pendiente, la zona cubierta de bosques o lagos. El tamaño de un elemento de la malla puede ser variado desde 100 por 100 metros hasta 10 por 10 kilómetros.

El modelo utiliza datos de estaciones fisiográficas, meteorológicas e hidrométricas, estos datos incluyen las características fisiográficas de cada uno de los cuadros de las mallas, los datos de precipitación, las descargas de las corrientes, los niveles de almacenamiento en los embalses y las descargas de los mismos.

#### Aplicaciones.

- Análisis de la evolución del flujo del agua en el espacio y en el tiempo dentro de la cuenca en estudio.

- Introducción de modificaciones artificiales de caudales y análisis de las mismas.

- Análisis de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de las condiciones originales de los cauces.

- Calculo de escurrimientos.

#### Desventajas.

- Requiere mucha información bien organizada en una base de datos.

- Se tiene que especificar el detalle de la red de drenaje.

- Introducir los modelos numéricos de elevación se complica.

### 3.2.6 Modelo WEAP (water evaluation and planning system)

---

WEAP 21, se distingue por su enfoque integral para simular los aprovechamientos hídricos y su orientación de políticas. El modelo coloca al mismo nivel la demanda (patrones de uso del agua, eficiencias de los equipos, re uso, precios y asignación) y la oferta (escurrimiento, agua subterránea, almacenamientos y transferencias) de agua. Los principales valores que WEAP contempla son un manejo de demanda, protección y preservación de la calidad del agua y los ecosistemas. En este sentido, WEAP es un laboratorio para examinar alternativas de desarrollos hídricos y estrategias de gestión integrada de los recursos hídricos. WEAP intenta cubrir la brecha entre la gestión integrada de los recursos hídricos y la hidrología de la cuenca, además de contar con un modelo de simulación que sea fácil de usar, accesible y fácilmente disponible a la comunidad hídrica.

Una característica más del software es la simulación de elementos naturales (demandas de evapotranspiración, escorrentías, flujos base) y humanos (embalses, bombeos de aguas subterráneas) de los sistemas de agua en estudio, lo que permite a los analistas obtener una visión más amplia de los múltiples factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos para su uso presente y futuro.

Como una base de datos, WEAP proporciona un sistema para mantener la información de la demanda y oferta de agua. Como una herramienta de pronóstico, WEAP simula la demanda de agua, el abastecimiento, los escurrimientos, el almacenamiento, la generación de contaminantes, el tratamiento y las descargas.

Como una herramienta de análisis de políticas, WEAP evalúa un amplio rango de desarrollos hídricos y opciones de gestión, también toma en cuenta los usos múltiples y competidores de los sistemas hídricos.

WEAP opera con el principio básico de contabilidad del balance de agua y se puede aplicar a sistemas municipales y agrícolas, cuencas independientes o sistemas complejos de ríos. Además, es capaz de evaluar una amplia gama de temas: demanda sectorial, conservación del agua, derechos de agua y prioridades de asignación, simulaciones de agua subterránea y superficial, operación de almacenamientos, hidro-generación de energía eléctrica, seguimiento de la contaminación y análisis de beneficio-costos.

La modelación en WEAP se realiza en varios pasos; el estudio para definir el plazo de la simulación, las fronteras espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema. Es importante que antes de iniciar la implantación de WEAP se realice un trabajo previo para analizar la información disponible y el objetivo de la simulación.

El escenario base de análisis de WEAP representa la situación actual del sistema modelado, como lo son: las fuentes de abastecimiento y de oferta del sistema, cargas de contaminación, hipótesis de condiciones futuras las cuales se basan en políticas, costos y desarrollos tecnológicos, entre otros factores que modifican a las demandas. Los escenarios consisten en conjuntos alternativos de hipótesis y políticas, los escenarios se evalúan con respecto a la suficiencia del agua, los costos y beneficios, la compatibilidad con las metas ambientales y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables clave.

**Tabla 3. Ventajas y desventajas de algunos modelos**

Modelo	Ventajas	Desventajas
Hec-Ras	Interface gráfica	Se enfoca principalmente al análisis de flujo a cielo abierto
	Interacción con Arc-GIS	El flujo debe ser permanente
	Permite analizar el desempeño de estructura como puentes, alcantarillas ó diques	El canal de análisis debe tener una pendiente de menos de 1:10
	Visualización gráfica de datos y resultados	Para flujo gradualmente variado y rápidamente variado se utilizan ecuaciones empíricas

MIKE SHE	Permite la programación de condiciones lógicas en cada intervalo de tiempo	Requiere definir una gran cantidad de parámetros
	Simula áreas de inundación y mapas de riesgo	La modelación en interfaz grafica permite perder de vista fácilmente el objetivo del modelo
	Calcula estructuras sobre el río	Se enfoca en la modelación del flujo en canales abiertos
	Visualización gráfica de datos y resultados	Las cuencas debes tener una extensión máxima de 80 000 km2
	Permite la modelación conjunta de las cuencas hidrológicas completas	
WEPP	Tiene capacidad de representar geometrías complejas de los suelos	Los periodos de tiempo para el cálculo mínimos son de 24 horas
	su pueden programar las prácticas de cultivo y manejo de suelos en laderas	
	Modela la erosión ente canalillos	Se enfoca a la erosión de suelos
	Calcula el esfuerzo hidráulico cortante en el fondo del canal	No realiza tránsitos hidráulicos
SIMGES	Permite la programación de políticas para la explotación de las fuentes	Modelo relativamente viejo
	Puede modelar interacción entre las demandas, fuentes y diferentes restricciones entre estas	Programado con características especiales para España
	Genera reportes con propuestas de soluciones lógicas para los sistemas	Periodos de tiempo para el cálculo fijos de un mes
	Analiza las capacidades de embalses, conducciones y estaciones de bombeo	
CEQUEAU	Analiza los beneficios o perjuicios de alteraciones al cauce original	Requiere demasiada información bien organizada en una base de datos
	Calcula la evolución del flujo de agua en el espacio y en el tiempo	La introducción de modelos digitales de elevación es complicada en algunos casos
	Es un modelo de parámetros distribuidos	La red de drenaje debe estar bien definida
	Las unidades en las mallas pueden ser desde 100 x 100 m hasta 10 x 10 km	Se enfoca en el análisis de modelos lluvia - escurrimiento
WEAP	Permite la modelación conjunta de las cuencas hidrológicas completas	El enfoque principal del modelo es el análisis de políticas de operación
	Interface gráfica	Requiere una gran cantidad de parámetros para modelar las relaciones río acuifero
	El numero de variables en cada modelación lo define el modelador	La conexión de modelo con un modulo de MODFLOW es complicada
	Entrega resultado de manera gráfica	El análisis de calidad de agua es muy elemental
	Permite la programación de sentencias lógicas en cada intervalo de tiempo	
	Permite la modelación de diversos escenarios	

## 4. Aplicación en la cuenca media del Río Sonora

---

### 4.1 Objetivo de modelación y elección del modelo

---

La presente modelación tiene como principal objetivo el análisis de políticas de operación del sistema de agua potable de la ciudad de Hermosillo, considerando la explotación del recurso superficial y subterráneo. Se busca cubrir las necesidades agrícolas, comerciales y urbanas en equilibrio con el ambiente, es decir alcanzar la sustentabilidad.

Acorde con el objetivo principal de la modelación el modelo elegido debe permitir la interacción entre las explotaciones superficiales, subterráneas y las demandas finales. La falta de información de los parámetros necesarios para la modelación de agua subterránea de la zona obliga a buscar una simplificación de la interacción entre acuíferos, por lo que el software debe permitir la programación personalizada de dicha interacción.

El modelo debe permitir diferenciar niveles de importancia entre las demandas que se incluirán en la zona, además de facilitar la programación de políticas de operación especiales en los vasos de almacenamiento superficial. El manejo de resultados debe ser lo mas simple y de ser posible gráfico.

El programa WEAP, descrito en la sección 3.2.6, cubre las necesidades principales además de permitir el acceso a una licencia temporal con la que es posible la completa utilización del programa y sus módulos.

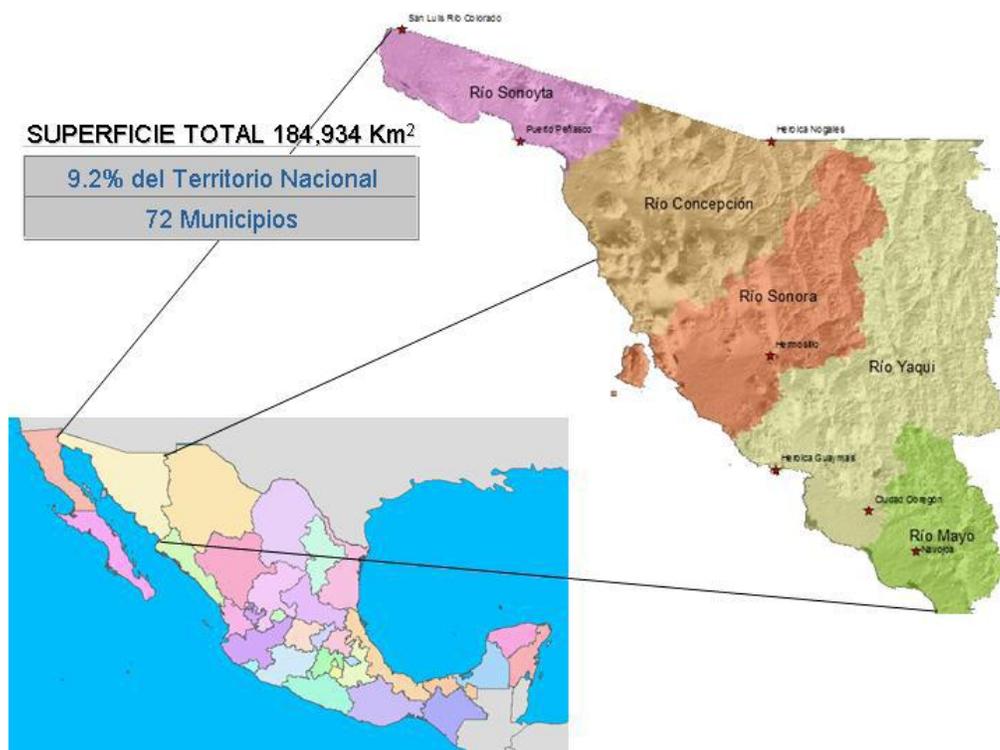
#### 4.2.1 Caracterización de la zona de estudio

---

El Estado de Sonora se localiza al noroeste de la República Mexicana, limita al norte con Estados Unidos de América; al este con Chihuahua; al sur con Sinaloa y el Golfo de California; al oeste con el Golfo de California y Baja California. Se ubica entre los paralelos 32° 29" y 26° 14" de latitud norte y entre los meridianos 108° 26" y 115° 02" de longitud oeste. Su extensión territorial es de 184,934.00 km<sup>2</sup>, representando el 9.2% de la superficie del territorio nacional y ocupando el segundo lugar entre las entidades federativas del país en cuanto al tamaño.

De acuerdo al censo del año 2000 del INEGI, la población total en el estado de Sonora era de 2 216 969 habitantes y en el Censo de población del 2005 se reportaron 2 394 861 habitantes, de tal manera que la población tuvo un crecimiento de 8.0% en el período, equivalente al 1.6% anual, tasa superior al incremento a nivel nacional que fue del 1.16 % anual entre 2000 y 2005. La población del 2005 en la Región representa el 2.41% de la población nacional y la densidad de población es de 12.1 hab/km<sup>2</sup>, inferior al promedio nacional de 51 hab/km<sup>2</sup>.

La población de las diferentes subregiones de planeación de los años 1995 y 2005 sufrió un incremento en la población urbana de todas las subregiones, mientras que la población rural ha sufrido una reducción. Siendo más crítico este fenómeno en la subregión Río Mayo en donde la población rural descendió de 198,677 habitantes en el año 1995 a 128,250 habitantes en el año 2005; para esta misma subregión la población que habita en localidades urbanas aumentó de 142,406 habitantes en 1995 a 201,406 habitantes en 2005. En términos generales la población total del Estado aumentó un 16.4% en el periodo de 1995 al 2005, reduciéndose la población que habita en localidades rurales en un 47.8%.



**Ilustración 14. Sonora**

La Población Económicamente Activa (PEA), estimada al 2005 con base en el último dato del INEGI (IV trimestre de 2004), ascendió a 1 047 000 personas en Estado, de la cual aproximadamente el 2.3% corresponde a la tasa de desempleo; en cuanto a su distribución por grandes sectores de la economía, el 12.6% de la PEA labora en el sector primario (agricultura y ganadería), el 26.1 % en el sector secundario o industrial y el 61.3% en el sector terciario o de servicios.

Para una estimación de los niveles de pobreza de la región, se cuenta con los índices elaborados por el CONAPO (Índice de marginación) y por la ONU (Índice de Desarrollo Humano) que conjugan factores como hacinamiento de la población, alimentación, educación, salud, ocupación, vivienda y servicios, entre otros. CONAPO clasifica al Estado con un grado de marginalidad bajo; mientras que el Índice de Desarrollo Humano le asigna una calificación de desarrollo humano alto, ubicándose en 2005 en el lugar número 10 de toda la república. El estado de Sonora, dentro del contexto nacional, cuenta con índices de desarrollo humano y PIB per cápita entre los más altos de la República; así, se tiene que mientras 19 de los 72 municipios que la conforman, presentan un índice de desarrollo humano considerado Alto y dentro del 2% más alto del país.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) es un indicador compuesto que mide el avance promedio de tres dimensiones básicas del desarrollo humano, a saber: vida larga y saludable, acceso a conocimientos y nivel de vida digno. En el Estado 12 Municipios son los que presentan los índices más bajos, mientras que 19 municipios presentan los más altos índices de desarrollo humano.

Cabe señalar que la población con alta o muy alta marginación, a la vez que sufre graves deficiencias en el abastecimiento de agua, en muchos casos, particularmente en las áreas rurales, se ve obligada a hacer un uso no sustentable de los recursos naturales, lo que afecta en forma negativa la condición de los recursos hidráulicos del Estado.

Tres de los municipios del Estado presentan un grado de marginalidad alto ubicándose dos de ellos en la subregión Río Mayo y el tercero en la subregión Río Sonora; en 8 municipios el grado de marginalidad es medio, 5 de estos municipios se localizan en la subregión Río Yaqui, 2 en la subregión Río Mayo y un municipio en la subregión Río Sonora.

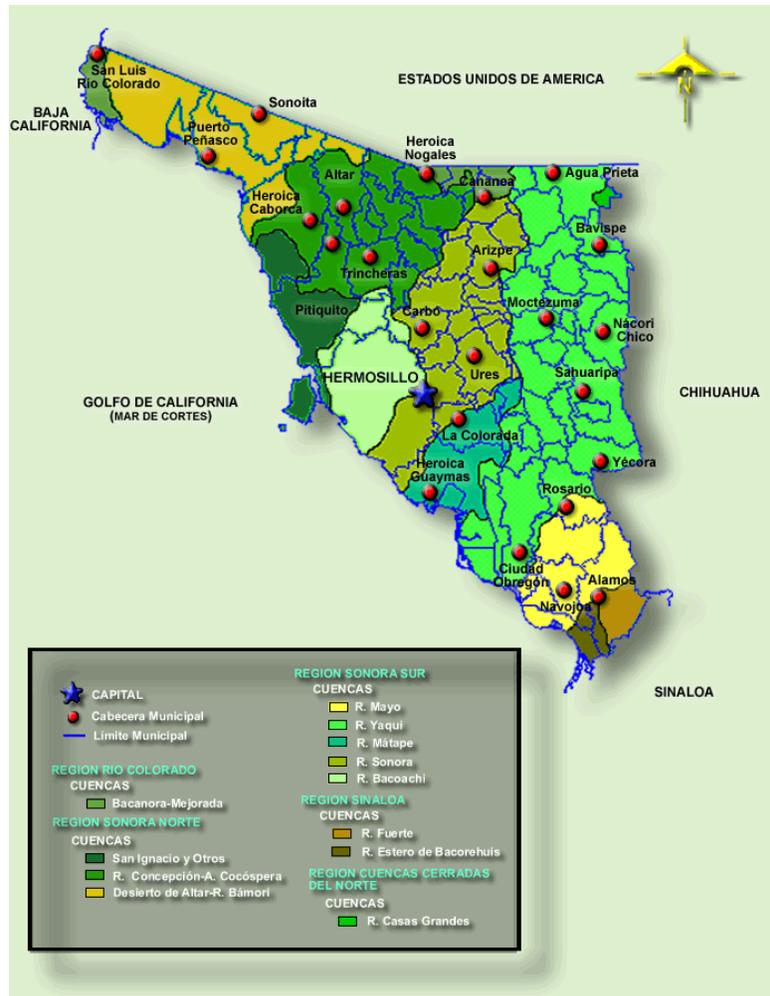


Ilustración 15. Regiones hidrológicas

#### 4.2.2 Definición y descripción de la zona de estudio

El río Sonora se caracteriza por un comportamiento errático y con frecuencia, concentra sus escurrimientos en unos cuantos días del año en forma de avenidas que son controladas por el sistema de presas Abelardo L. Rodríguez (Hermosillo) y Rodolfo Félix Valdés (El Molinito), los cuales tienen una capacidad conjunta para almacenar 525 Hm<sup>3</sup>.

La presa Rodolfo Félix Valdés (El Molinito) entró en operación en 1995 y se destina fundamentalmente a proteger a la ciudad de Hermosillo contra inundaciones provocadas por el desbordamiento del río Sonora y a resolver los problemas del desarrollo urbano que se presentaron al incorporar a la ciudad cerca de 800 Ha de terrenos del cauce de dicha corriente, que cruza la ciudad, afectando un área muy importante que se encontraba sometida a un uso inadecuado del suelo. El río Sonora se aprovecha aguas arriba de la presa Abelardo L. Rodríguez (Hermosillo) en riegos agrícolas y consumo doméstico, pero su escurrimiento también resulta de importancia en la recarga de los acuíferos. El clima en la cuenca es árido extremoso, con una temperatura media anual de 25 °C. La precipitación media anual es de 376 mm y el escurrimiento medio anual es de 165 Hm<sup>3</sup>; en la cercanía a Hermosillo se localizan dos acuíferos importantes, llamados Pesqueira y La Victoria-Mesa del Seri respectivamente.

Para el modelo se considera el Río Sonora desde la estación “El Orégano” hasta terminar el distrito de riego “La yesca”, los Ríos Zanjón y San Miguel; el Río Zanjón poco antes de unirse con el San Miguel, por último el Río San Miguel desde la estación “El cajón” hasta unirse con el Río Sonora. Los acuíferos que fueron considerados son los acuíferos que abastecen a la ciudad de Hermosillo, “Los Bagotes”, “Pueblitos”, “Pesqueira”, “Mesa del Seri”, “La Poza” y un acuífero que se encuentra en la zona de riego después de la ciudad de Hermosillo, “La yesca”. Todo esto se encuentra contenido en parte de la cuenca del Río Sonora y parte de la cuenca del Río Bacoachi.

La información de aforos y volúmenes de escurrimiento a nivel mensual, fue tomada de las estaciones “El Orégano” y “El Orégano II” para el caso del río Sonora, mientras que para el río San Miguel, de la estación hidrométrica “El Cajón”. La información de estas dos estaciones servirá de base para la estimación de los volúmenes de escurrimiento en las subcuencas de análisis, principalmente a través de criterios de transporte de información hidrométrica a nivel anual, y por el método de los fragmentos a nivel mensual.

Los registros existentes de ambas estaciones hidrométricas fueron proporcionados por la Subdirección General Técnica - Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. La longitud de estos registros va de 1974 al 2001 para el caso de la estación “El Cajón”, mientras que para la estación “El Orégano” se cuenta con un registro que va de 1942 a 1990; fecha en que se inició la construcción de la presa Ing. Rodolfo Félix Valdez “El Molinito” y que inundó el sitio de la estación, y de 1991 a 2002, ya que la estación fue trasladada hacia aguas arriba del primer sitio y fuera de la influencia de la curva de máximo embalse.

En el registro de la estación El Orégano no se presentan datos para los años 1991, 1992, 1993 y 1994, posiblemente por motivos de la construcción de la presa “El Molinito”, por lo tanto, para estimar los datos para esos años y dado que no se cuenta con estaciones hidrométricas cercanas que permitan deducir la información a partir de sus registros, el criterio seguido fue el de considerar el promedio anual de los años con información dentro del período considerado, y el promedio de los porcentajes de los volúmenes mensuales de escurrimiento los que se obtuvieron de dividir los datos de cada mes entre el dato anual para el mismo año.



Ilustración 16. Zona modelada

### 4.2.3 Recursos superficiales

Dentro del Estado de Sonora ocurren 5 regiones hidrológicas, una de ellas de manera completa dentro del territorio nacional, la región hidrológica No. 8 Sonora Norte, además se presentan de manera parcial la 9 Sonora Sur y abarcando pequeñas porciones dentro del Estado se presentan las regiones hidrológicas 7 Río Colorado, la 34 Cuencas Centrales del Norte y la No. 10 Sinaloa.

La Región Noroeste comprende a las Regiones Hidrológicas 8 (Sonora Norte) y 9 (Sonora Sur) que pertenecen a la Vertiente Occidental o del Océano Pacífico. La Región 8 comprende 56 177 km<sup>2</sup> en el territorio nacional y se divide en dos subregiones hidrológicas: 8A Río Sonoyta y 8B, Río Concepción. La región 9 comprende 137 185 km<sup>2</sup> dentro del territorio nacional y se divide en 3 subregiones hidrológicas: 9A Río Sonora, 9B Río Yaqui y 9C Río Mayo.

Los principales ríos del Estado de Sonora son:

El Río Sonoyta nace con el nombre de arroyo Coyote en la Sierra de Pozo Verde, 8 km al Sur de Sásabe, Sonora. Su trayectoria es de 178 km hasta su desembocadura en el Golfo de California y tiene una pendiente media de 0.35%.

El Río Concepción nace de la confluencia de los Ríos Alisos y Cocóspera, cubre una trayectoria de 132 km hasta su desembocadura en el Golfo de California y tiene una pendiente media de 0.27%.

El Río Sonora de flujo perenne, se origina en la sierra de Magallanes, tiene una longitud de 294 km, desemboca en la zona de inundación de la presa Abelardo L. Rodríguez con una pendiente media de 0.8%.

El Río Mátape tiene su nacimiento al sureste de la localidad de Mazatán y descarga en el vaso de la presa Ignacio L. Alatorre, tiene una longitud de 82 km, una pendiente media de 0.38 %.

El Río Yaqui es el colector principal y nace de la unión de los Ríos Bavispe y Aros. Tiene una longitud total de 397 km hasta su desembocadura en el estero de Los Algodones en el Golfo de California y posee una pendiente media de 0.11.

El Río Mayo nace en la Sierra Madre Occidental (Estado de Chihuahua). Tiene una longitud total de 294 km hasta su desembocadura en el Golfo de California y una pendiente media de 0.68%.

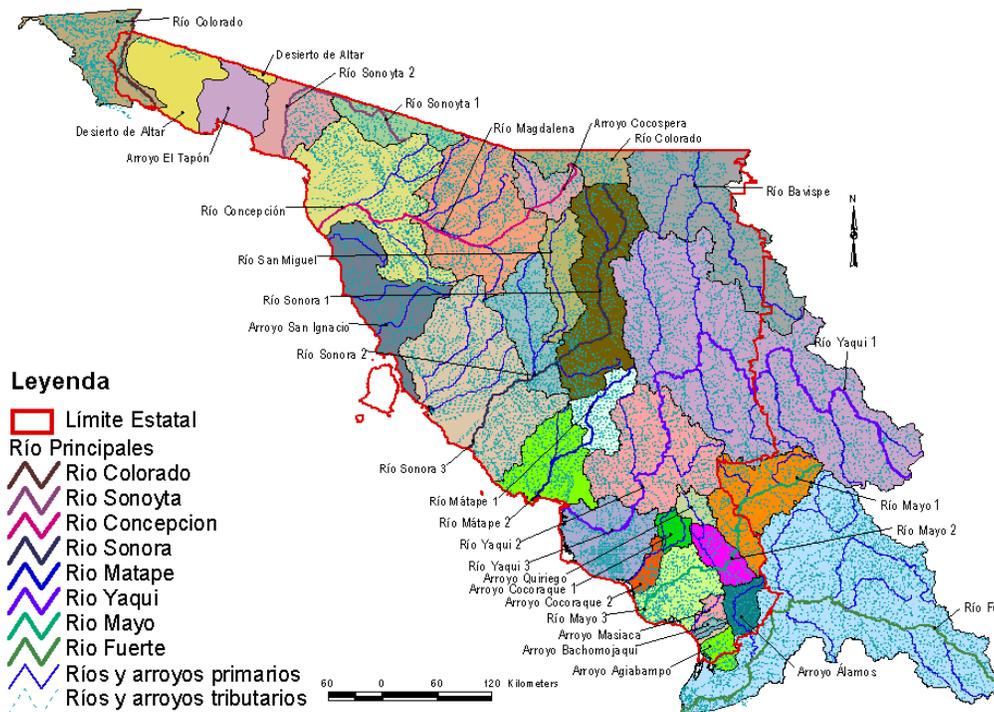


Ilustración 17. Principales ríos de Sonora

La disponibilidad del agua superficial en la Región Noroeste está distribuida de manera irregular, pues mientras que en las cuencas del sur y del este de la región se concentra el 88% del agua superficial, el 12% restante se distribuye en el 60% del territorio.

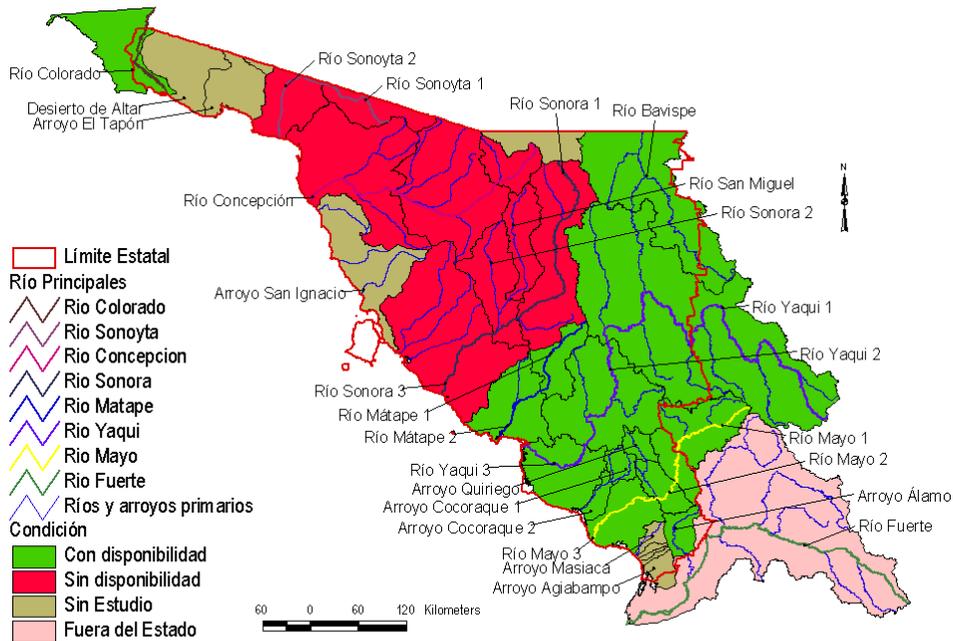


Ilustración 18. Disponibilidad de agua superficial en el estado de Sonora

#### 4.2.4 Recurso subterráneo

---

La escasez del agua superficial en la parte del Estado ha propiciado la explotación de los mantos acuíferos, a fin de proveer de agua subterránea principalmente a las actividades agrícolas. Dentro del Estado de Sonora, se consideran 60 acuíferos con un área de recarga de 195 793 km<sup>2</sup>.

Los acuíferos de mayor importancia por sus grandes volúmenes de extracción son los de Caborca, Costa de Hermosillo, Valle del Yaqui, Valle del Mayo y Río Sonora; las extracciones conjuntas de ellos representan el 49.7% del total de las extracciones del Estado. Los principales acuíferos localizados en el Estado son de tipo costero y libre, siendo común encontrar un conjunto de dos acuíferos, uno superior y otro inferior, con la combinación de tipo libre y semiconfinado.

De los 60 acuíferos que existen en el Estado, 18 se encuentran sobreexplotados (2 en la subregión Sonoyta, 4 en la subregión Concepción, 7 en la subregión Sonora, 4 en la subregión Yaqui y uno en la subregión Mayo), estos acuíferos sobreexplotados se ubican principalmente en la zona costera centro y sur del Estado, 4 acuíferos se encuentran en equilibrio. La recarga total anual de estos 60 acuíferos es de 3,023.4 hm<sup>3</sup> y la extracción total al 2008 es de 2560.8 hm<sup>3</sup>/año, por lo que la disponibilidad global resultante es de 462.63 hm<sup>3</sup>/año.

Solo se ha publicado la disponibilidad de 26 acuíferos del Estado de Sonora y se tiene en programa publicar 7 más (Valle de San Luis Río Colorado, Cocóspera, Caborca, La Poza, Santa Rosalía, Río Sahuaripa y Fuerte Mayo), y posiblemente se publiquen otros 5 más, (Puerto Libertad, Bacoachi, Bacanuchi, Río Agua Prieta y Río Tecoripa); por lo tanto faltarían 22 acuíferos del Estado de contar con estudios técnicos de disponibilidad. Cabe destacar que el volumen de sobreexplotación de los 18 acuíferos sobreexplotados es de 439.35 hm<sup>3</sup>/año, que equivale al 148% de la recarga total de esos mismos acuíferos. El 53% del agua subterránea del Estado proviene de acuíferos sobreexplotados.

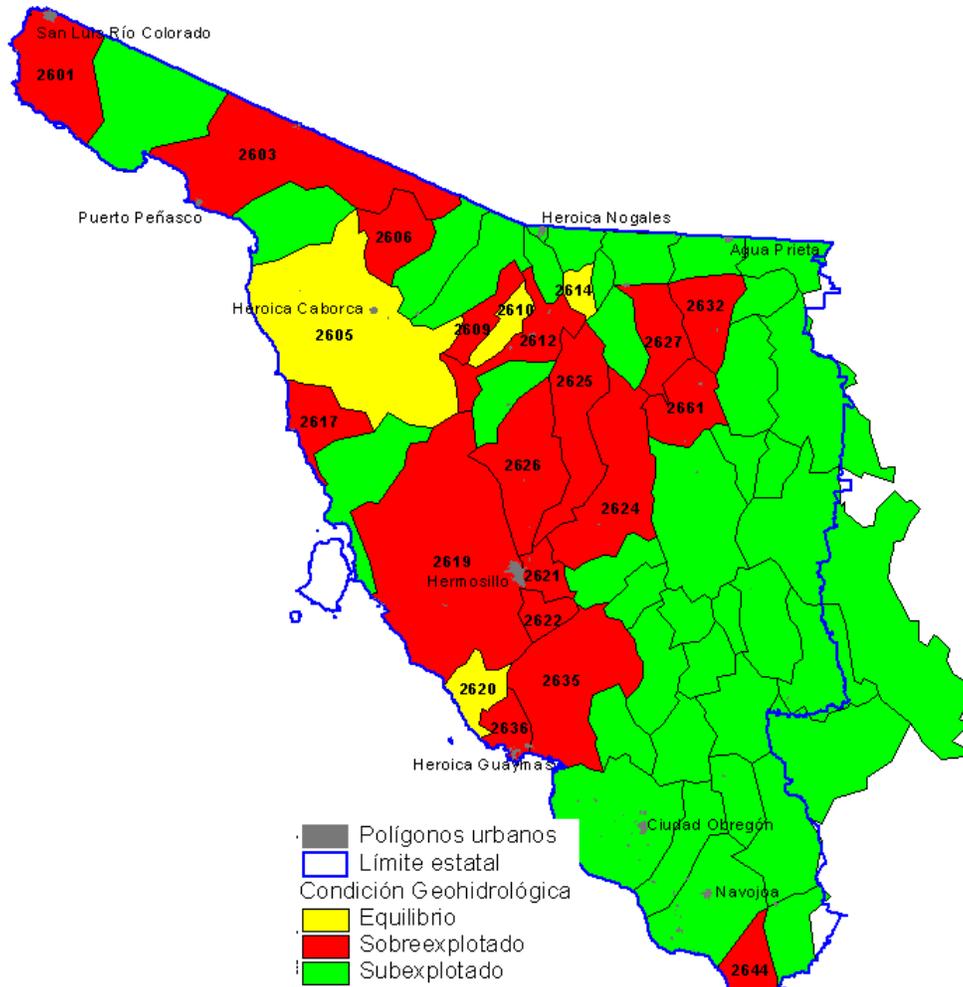


Ilustración 19. Acuíferos y situación actual del estado de Sonora

Tabla 4. Claves de los acuíferos del estado de Sonora

Clave	Nombre del acuífero	Clave 2	Nombre del acuífero
2601	Valle de San Luis río Colorado	2626	Río Zanjón
2603	Sonoyta - Puerto Peñasco	2627	Río Bacoachi
2606	Los chirriones	2632	Río Frontera
2609	Busani	2635	Valle de Guaymas
2612	Magdalena	2636	San José de Guaymas
2617	Puerto Libertad	2644	Fuerte - Mayo
2619	Costa de Hermosillo	2661	Cumpas
2621	Mesa del Seri - La Victoria	2605	Caborca
2622	La Poza	2610	Coyotillo
2624	Río Sonora	2614	Cocospera
2625	Río San Miguel	2620	Sahuaral

El ritmo de explotación, efectuado durante las últimas décadas en las principales zonas geohidrológicas del Estado, ha inducido fluctuaciones de la superficie piezométrica.

Esto es especialmente preocupante en los 11 acuíferos principales del Estado y en los que la medición de niveles se realiza de forma anual, es en estos 11 acuíferos en donde se depende del abastecimiento de agua para uso agrícola y para el de zonas urbanas importantes como lo es la ciudad de Hermosillo.

Tan solo de estos 11 acuíferos se extraen 1 531 hm<sup>3</sup> al año, lo cual equivale al 51% del total de las extracciones de aguas subterráneas en el Estado. Asimismo, de estos 11 acuíferos, 6 se encuentran en estado de sobreexplotación y en su conjunto presentan una diferencia entre la recarga y su extracción de 31.4 hm<sup>3</sup>, o 102% ya que la recarga media es de 1 499 hm<sup>3</sup> y la extracción es 1530.4 hm<sup>3</sup>

Por otro lado, en este grupo de acuíferos se encuentran cuatro que dado su sostenido nivel de explotación ya presentan intrusión salina. Esta condición disminuye el rendimiento agrícola y en algunos casos incluso, obliga a los agricultores a abandonar sus tierras.

**Tabla 5. Condición geohidrológica de los 11 acuíferos de mayor importancia relativa por abatimiento, volúmenes abastecidos e impacto económico en el Estado**

Nombre del acuífero	Subregión	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Extracción concesionada	Diferencia (hm <sup>3</sup> /año)	% explotación	Condición geohidrológica	Intrusión salina
Sonoyta Puerto Peñasco	Río Sonoyta	41.4	46.3	-4.9	111.8	Sobreexplotado	S
Caborca	Río Concepción	300.0	296.5	3.5	98.8	Equilibrio	S
Río Alisos		8.0	4.2	3.8	52.5	Subexplotado	N
Río San Pedro		41.0	19.3	21.7	47.1	Subexplotado	N
Costa de Hermosillo		250.0	430.5	-180.5	172.2	Sobreexplotado	S
Mesa del Serí - La Victoria		73.0	120.0	-47.0	164.4	Sobreexplotado	N
Río San Miguel	Río Sonora	52.5	57.0	-4.5	108.6	Sobreexplotado	N
Río Zanjón		94.8	115.6	-20.8	121.9	Sobreexplotado	N
Sahuaral		70.0	69.4	0.6	99.1	Equilibrio	N
San José de Guaymas	Río Yaqui	4.5	8.1	-3.6	180.0	Sobreexplotado	S
Valle del Yaqui		564.1	363.9	200.2	64.5	Subexplotado	N
Total		1499.3	1530.7	-31.4	102.1		

#### 4.2.5 Infraestructura hidráulica existente

La infraestructura hidráulica con que cuenta el Estado de Sonora, para suministrar el agua que se requiere para los diferentes usos, es la siguiente:

31 Presas con una capacidad total de almacenamiento de 8648 hm<sup>3</sup>, 17 ubicadas en la subregión del Río Yaqui, 7 en la subregión del Río Sonora, 4 en la subregión del Río Concepción, 3 en la subregión del Río Mayo.

8 Distritos de riego con una superficie total de riego de 499 044 ha, 925 Urderales con una superficie aproximada de riego de 135 710 ha.

22 Plantas potabilizadoras en operación y 68 Sistemas de tratamiento de agua residual.

139 Estaciones climatológicas y 23 Estaciones hidrométricas.



Ilustración 20. Presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito)

## *Presas*

---

En el Estado de Sonora existen 31 presas almacenadoras importantes. La subregión con mayor infraestructura es la del Río Yaqui-Mátape, en la que se localizan 17 de las 31 presas; le sigue la Río Sonora con 7, la Río Concepción 4 y la Río Mayo con 3.

Se cuenta con una capacidad de almacenamiento de 8 648 hm<sup>3</sup>. El uso principal de la mayoría de las presas es agropecuario y para el control de avenidas; sólo en baja proporción son utilizados en el uso público urbano, la industria, generación de energía y otros. De estas 31 presas, 3 son utilizadas para la generación de energía eléctrica.

El estado general de las obras se puede considerar como bueno, y sólo algunos bordos de almacenamiento se encuentran en condiciones regulares de estabilidad, requiriendo acciones para su rehabilitación como es: sobre elevar cortinas y/o vertedores y dar mantenimiento a los mecanismos de las obras de toma.

Una presa se considera con riesgo cuando, aguas abajo de la misma, se localizan poblaciones con 200 viviendas ó más de 1 000 habitantes; o bien, centros de elevada actividad industrial o áreas con un alto índice de productividad agrícola y/o explotación diversa de 500 ó más hectáreas. Una presa puede conformar un peligro para los sistemas existentes en su entorno, ya sea por su capacidad limitada de almacenamiento ante la presencia de grandes avenidas, o por fallas estructurales, de diseño o de operación. De las 29 presas, 12 están consideradas con un grado alto o medio de peligrosidad.

## *Distritos de Riego*

---

Los Distritos y Unidades de Riego fueron diseñados de acuerdo con la tecnología prevaiente para la aplicación del agua por gravedad en las parcelas. En muchos casos sólo se construyeron las redes de canales y drenes principales, quedando las obras parcelarias a cargo de los usuarios. Esto, sumado al deterioro de la infraestructura, acumulado en varias décadas por la escasez de recursos económicos destinados a su conservación y mejoramiento, propiciaron una baja en la eficiencia global en el manejo del agua.

El desarrollo de los ocho distritos del Estado de Sonora empezó en los años 40, como parte de una estrategia nacional de incorporar los territorios del norte al desarrollo nacional. Las primeras acciones incluyeron la construcción de zonas de riego para aprovechar los escurrimientos de los Ríos Yaqui y Mayo, con la creación de los distritos de riego 018, Colonias Yaquis en 1937, 037, Río Mayo y 041, Río Yaqui en 1951. La construcción de estas obras hidroagrícolas incidieron favorablemente en el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la región, al aumentar la oferta de productos alimenticios y la creación de empleos temporales y permanentes.

La superficie total de los 6 distritos de riego que se localizan de manera completa dentro del Estado es de 493,334 ha; área que dentro del año agrícola 2006-2007 fue aprovechada por 33 987 usuarios. Los distritos de riego del Estado, comprenden cerca del 15% de la superficie total de distritos de riego a escala nacional. Durante el proceso de transferencia de los distritos, iniciado en 1989, se actualizaron los padrones de superficie y usuarios, a fin de otorgar los correspondientes títulos de concesión. Las cifras obtenidas de dichas actualizaciones se consideraron oficiales en cuanto a superficie y número de usuarios, aunque la propia dinámica de los padrones provoca modificaciones con el tiempo. La siguiente tabla contiene información del año agrícola 2006-2007. La superficie total se refiere a la superficie física empadronada.

## *Agua potable y alcantarillado*

---

Dentro del Estado de Sonora, la Comisión Estatal del Agua (CEA) tiene reportada la existencia de 396 fuentes de abastecimiento para uso público-urbano en cabeceras municipales, la mayor parte de estas fuentes son pozos profundos. Estas fuentes producen un caudal de 10,362 l/s, que de acuerdo a sus horarios de operación respectivos, producen un volumen anual de 319.6 hm<sup>3</sup>/año; dato inferior al que se tiene inscrito en el REPGA, el cual es de 350 hm<sup>3</sup>/año.

Por otro lado, en las cabeceras municipales del Estado existe un total de 2438 estructuras de almacenamiento de agua potable, con una capacidad conjunta de 732,818 m<sup>3</sup>, siendo la subregión Río Concepción en donde se concentra el mayor porcentaje instalado de almacenaje de agua potable, con el 73.8%, la subregión Río Yaqui tiene el 12.4%, la subregión Río Sonora concentra el 11.4%, la Río Mayo posee el 1.8% y la subregión Sonoyta apenas alcanza el 0.7%.

Por lo que respecta a la infraestructura de potabilización, en el Estado de Sonora existe un total de 20 plantas potabilizadoras con una capacidad instalada de 2890 l/s, en donde se potabiliza anualmente un volumen de 1579.5 l/s. Por otro lado se desinfecta mediante cloración un volumen anual de agua del orden de 319 hm<sup>3</sup>/año.

En el Estado de Sonora existe un total de 66 sistemas de tratamiento de agua residual, las cuales en conjunto tienen una capacidad instalada de 4224 l/s (132 hm<sup>3</sup>/año) y una capacidad de operación de 3,004 l/s (95 hm<sup>3</sup>/año).

Si el volumen total utilizado para el abastecimiento público-urbanos es de 350 hm<sup>3</sup>/año y de 69 hm<sup>3</sup> para uso industrial, tenemos que se utiliza un volumen total de 459 hm<sup>3</sup>/año; si se produce un retorno de agua residual del 70%, se genera un volumen de agua residual de alrededor de 293.3 hm<sup>3</sup>/año. Por otro lado si tomamos en cuenta que la cobertura global de alcantarillado es de 83.5% entonces tenemos que se recolecta un volumen promedio de 245 hm<sup>3</sup>/año de agua residual, del cual actualmente solo se trata el 39% (95 hm<sup>3</sup>/año) y si se pusiera en funcionamiento toda la capacidad instalada que actualmente existe, únicamente se podría tratar el 54% del volumen total recolectado. La generación de materia orgánica en agua residual de uso público-urbano, medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno (“DBO”), para el Estado de Sonora, se estima en 38 400 toneladas al año, de las cuales 32 985 se recolectan mediante los sistemas de alcantarillado. Únicamente 21 770 toneladas de DBO, son tratados adecuadamente, antes de ser descargadas al medio ambiente.

**Tabla 6. Datos básicos de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento**

Datos básicos de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento						
Municipio						
	Hermosillo	Cajeme	San Luis R. C.	Nogales	Navojova	Guaymas
Población	748,343	278,205	196,079	189,759	112,155	132,397
Cobertura %						
Agua potable	98	100	100	85	95	98
Alcantarillado	97	99	70	90	76	85
Numero de tomas						
Domiciliaria	203,232	92,333	50,745	36,440	31,792	30,562
Comercial	11,119	5,884	2,691	1,190	1,607	1,666
Industrial	367	2	95	55	14	36
Otros	-	23,275	-	-	151	95
Total	214,718	121,494	53,531	37,685	33,564	32,359
Agua suministrada l/s	3,281	1,297	990	697	446	552
% desinfectado	100	100	100	96	100	100
Tratamiento de aguas l/s	2.5	850	14	-	-	350
Capacidad instalada y operada	2.5	483	14	523	-	-
Facturación total \$	238,222,287	140,813,563	78,872,308	109,628,465	40,120,523	56,944,969

Por lo que respecta a las subregiones de planeación, la subregión Río Yaqui es la que tienen el mayor porcentaje de tratamiento de agua residual, con el 60% del total tratado del Estado, le sigue la subregión Río Concepción con el 19%, en tercer lugar se encuentra la subregión Río Sonoyta, con el 12%, luego la Subregión Río Sonora con el 8% y en último lugar se encuentra la subregión Mayo con apenas el 0.3% del volumen total tratamiento de agua residual del Estado.

#### 4.2.6 Análisis de la demanda

El volumen total concesionado dentro del Estado de Sonora para usos consuntivos y no consuntivos es de 6,741.1 hm<sup>3</sup>/año; de este volumen, el 42% corresponde a volúmenes de agua subterránea y el 58% a volúmenes de agua superficial. Del volumen concesionado para usos consuntivos (6575 hm<sup>3</sup>), el 92.7% se encuentra concesionado al uso agrícola, el 5.3% se encuentra concesionado al uso doméstico, el 1% se encuentra concesionado a la industria autoabastecida y el 1% restante se encuentra concesionado al uso pecuario y otros.

El grado de aprovechamiento del agua en el Estado, se manifiesta en el nivel de cobertura, superior a la media nacional, de los servicios de agua potable y alcantarillado que han respondido adecuadamente al fuerte proceso de urbanización; la extensión de las áreas de riego y de producción pecuaria, que hacen del Estado uno de los más importantes centros de producción agrícola en el país, con más de 504 395 ha de riego (9.4% del total nacional); un vivo ejemplo de esto es el crecimiento del sector industrial, estimulado por las políticas de apertura y globalización y el resurgimiento de la actividad minera; el potencial de desarrollo del turismo, con una tendencia de consolidación en el mediano plazo soportada por importantes inversiones; así como las actividades acuícolas, que se desarrollan en 46 584 ha de espejo de agua con potencial de explotación en los litorales.

Tabla 7. Volumen concesionado por subregión de planeación

Usos	Demanda Hm3					
	Río Sonoyta	Río Concepción	Río Sonora	Río Yaqui	Río Mayo	Total Estado
Doméstico	32	44	112	116	46	350
Agrícola	155	875	889	3020	1154	6093
Industrial	2	4	22	36	5	69
Pecuario	0	6	14	23	10	53
Otros	0	8	0	2	0	10
Total	189	937	1037	3197	1215	6575

A nivel nacional, el Estado de Sonora utiliza el 8.7% del recurso hídrico aprovechado en el país, con una sobre representación relativa de los usos agrícola y público-urbano.

#### Distribución de los volúmenes concesionados

Los volúmenes concesionados para las diferentes subregiones de planeación están directamente relacionadas con la disponibilidad natural que existe en cada una de ellas, por ejemplo, el 48.6% del volumen total concesionado del Estado se tiene asignado a las localidades ubicadas en la subregión Río Yaqui-Mátape, el 18.5% se tiene concesionado en la subregión Río Mayo, el 15.8% se tiene para la subregión Río Sonora, el 14.3% para la subregión Río Concepción y el 2.9% para la subregión Río Sonoyta.

Los diferentes sectores usuarios demandan 6 575 hm<sup>3</sup>/año de agua superficial y subterránea, es decir, 82% del volumen promedio anual disponible. Los usos consuntivos demandan 3 814 hm<sup>3</sup>/año del escurrimiento superficial y 2 761 hm<sup>3</sup>/año del recurso subterráneo.

## 4.3 Formulación del modelo de optimación en software WEAP

---

### 4.3.1 Watter Evaluation and Planing System

---

El desafío del manejo de los recursos hídricos es cada vez más grande. La asignación del recurso para diversos usos requiere de una visión integral que unifiquen de manera eficaz los procesos de oferta, demanda, calidad del agua y consideraciones ecológicas.

El sistema de evaluación y organización del agua plantea incorporar a las necesidades anteriormente expuestas, una solución, mediante el uso de un instrumento práctico para su planificación. El software WEAP es desarrollado por el Stockholm Environment Institute (cuya sede está ubicada en la ciudad de Boston).

WEAP 21 se distingue por su enfoque integral para simular los aprovechamientos hídricos y su orientación de políticas. El modelo coloca al mismo nivel la demanda (patrones de uso del agua, eficiencias de los equipos, reúso, precios y asignación) y la oferta (escurrimiento, agua subterránea, almacenamientos y transferencias) de agua. En este sentido, WEAP es un laboratorio para examinar alternativas de desarrollos hídricos y estrategias de gestión integrada de los recursos hídricos. WEAP intenta cubrir la brecha entre la gestión integrada de los recursos hídricos y la hidrología de la cuenca, además de contar con un modelo de simulación que sea fácil de usar, accesible y fácilmente disponible a la comunidad hídrica. Con el modelo es posible simular condiciones de calidad del agua superficial.

Además, el modelo tiene un módulo de asignación del agua que toma en cuenta las demandas de agua, las necesidades de flujo en las corrientes superficiales para navegación o aspectos ambientales y el funcionamiento de los vasos de almacenamiento.

Para resolver la asignación del agua se emplea un método de programación lineal estándar cuyo objetivo es maximizar la satisfacción de la demanda sujeta a las prioridades de abastecimiento, preferencias de los sitios de demanda, balances de masa y otras restricciones.

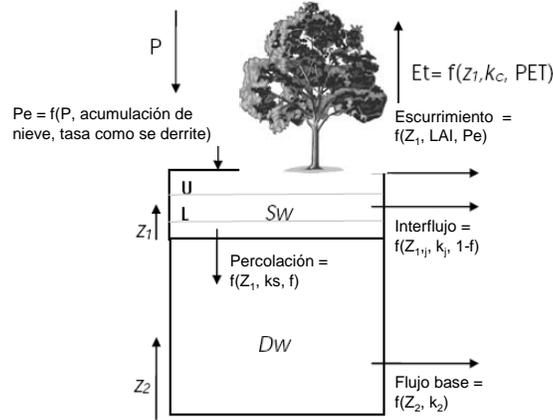
El conjunto de restricciones se define en cada intervalo para considerar consecutivamente el orden de las prioridades de la demanda y las preferencias del suministro. El enfoque tiene algunos atributos de un algoritmo tradicional de programación dinámica, porque el modelo se resuelve con una secuencia con base en el conocimiento de los valores derivados de variables y ecuaciones previas.

### *Hidrología Superficial*

---

La hidrología física del modelo consiste de varios componentes conceptualmente simples que se combinan para ser eficientes en el cálculo pero con la suficiente especificación para capturar los procesos hidrológicos importantes y evaluar asuntos claves en los aprovechamientos hídricos.

Para un cierto intervalo, el módulo de hidrología se corre para actualizar el estado hidrológico de la cuenca y proporcionar las constantes del balance de masa empleados en el problema lineal de asignación del agua en un segundo procedimiento dentro del mismo intervalo. Un esquema unidimensional con dos almacenamientos que contabilizan el agua en el suelo emplea funciones empíricas que describen la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, el escurrimiento sub-superficial o inter-flujo y percolación profunda.



**Ilustración 21. Almacenamiento de la humedad en dos capas de suelo mostrando las distintas entradas y salidas para una cierta cubierta vegetal o tipo de cultivo  $j$**

Se supone que el clima es uniforme sobre cada área fraccionada donde una ecuación del balance continuo de masa se escribe como:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = Pe(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t)z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 \quad (4.1)$$

Con el almacenamiento relativo del agua en el suelo  $z_{1,j}$  dado como una fracción del almacenamiento total efectivo y cuya variación está entre 0 y 1, donde 0 representa el punto de marchitamiento permanente y 1 la capacidad de campo.

El almacenamiento total efectivo de la capa superior se aproxima por una estimación de la capacidad del suelo de mantener el agua  $Sw_j$  en mm, prescrito para cada fracción de la cubierta vegetal  $j$ . WEAP 21 incluye un índice de la temperatura simple para tomar en cuenta a la nieve derretida  $m_c$ . La lluvia efectiva  $Pe$  en este caso se calcula como:

$$Pe = P_i m_c + m_r \quad (4.2)$$

El término  $PET$  se refiere a la evapotranspiración del área fraccionada  $j$ , donde  $PET$  es la evapotranspiración potencial de referencia del cultivo dado por Penman-Montieth, en mm/día y  $k_{c,j}$  es el coeficiente del cultivo / planta para cada fracción de cubierta vegetal.

Cuando el modelo se corre con intervalos grandes,  $PET$  se escala a una relación apropiada de lámina/tiempo.

El término  $Pe(t)z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}}$  representa al escurrimiento superficial donde LAI es el índice del área de zona con follaje, con el valor más bajo de LAI asignado a la cubierta vegetal que produce la mayor respuesta del escurrimiento como sucede con los suelos desnudos.

Los términos  $f_j k_j z_{1,j}^2$  y  $(1-f_j)k_j z_{1,j}^2$  se refieren al interflujo y a la percolación profunda respectivamente, donde el parámetro  $k_j$  es una estimación de la conductividad del almacenamiento superior (mm/tiempo) y  $f_j$  es un parámetro de ajuste relacionado con el suelo, la cubierta vegetal y la topografía que fracciona en partes al agua ya sea horizontalmente  $f_j$  o verticalmente  $(1-f_j)$ .

Las contribuciones del escurrimiento superficial y de interflujo del almacenamiento superior,  $Ro$ , de cada subcuena en el tiempo  $t$  es:

$$Ro(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left( Pe(t)z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} + f_j k_j z_{1,j}^2 \right) \quad (4.3)$$

Donde:

$A_j$  Es el área que contribuye de cada clase de cubierta vegetal  $j$ . Para las subcuencas sin un acuífero, la ecuación del balance de masa para el segundo almacenamiento esta dado por:

$$Dw \frac{dz_{2,j}}{dt} = (1-f_j)k_j z_{1,j}^2 - k_2 z_{2,j}^2 \quad (4.4)$$

Donde la afluencia a este almacenamiento profundo es la percolación profunda del almacenamiento superior dado por la ecuación  $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$ , y  $k_2$  es la tasa de conductividad del almacenamiento inferior (mm/tiempo) el cual está dado como un valor único para la cuenca, y  $Dw$  es la capacidad del almacenamiento de agua profundo (mm). Las ecuaciones  $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$  y  $Dw \frac{dz_{2,j}}{dt}$  se resuelven empleando un algoritmo de cuarto orden de Runge-Kutta.

El flujo base es simplemente:

$$Bf(t) = \sum_{j=1}^N A_j (k_2 z_{2,j}^2) \quad (4.5)$$

Cuando un acuífero aluvial se introduce en el modelo, el segundo término del almacenamiento se elimina y la recarga desde la subcuena es el término de la percolación desde el almacenamiento superior al acuífero,  $P$  (volumen/tiempo).

$$P = \sum_{j=1}^N A_j (f_j k_j z_{1,j}^2) \quad (4.6)$$

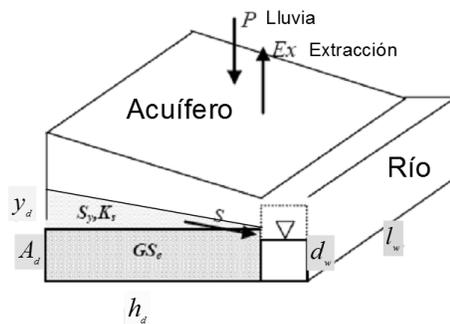
### Interacción del Agua Superficial y Subterránea

El agua superficial y subterránea están ligadas dinámicamente, cuando el agua subterránea se agota, una corriente contribuye a recargar el acuífero (una corriente con pérdidas), mientras que una corriente se considera que tiene ganancias cuando hay una recarga sustancial al acuífero a través de la cuenca y hay flujo del acuífero a la corriente.

Las zonas de riego pueden complicar aún más la relación, dado que el agua puede extraerse de la corriente, bombeada del acuífero local o volúmenes importados de otra cuenca, y así todas vacían o llenan el acuífero. WEAP 21 toma en cuenta la transferencia dinámica entre la corriente y el acuífero.

#### Interacción río - acuífero

El acuífero se toma como una cuña simétrica con respecto al río, con el almacenamiento total estimado suponiendo que el nivel de aguas freáticas está en equilibrio con el río.



- $h_d$  en m, representa la distancia normal que se extiende horizontalmente desde la corriente
- $l_w$  en m, es la longitud mojada del acuífero en contacto con la corriente,
- $A_d$  es la profundidad del acuífero en equilibrio, en m
- $y_d$  estimación de la altura a la que el acuífero permanece arriba o debajo del nivel del almacenamiento de equilibrio
- $d_w$  (m) es una estimación del tirante en el río, el cual se supone invariante en el tiempo
- $S_y$  es el rendimiento específico del acuífero
- $K_z$  (m/tiempo) es una estimación de la conductividad hidráulica saturada del acuífero

$GS_e$  es el almacenamiento en equilibrio para un lado de la cuña:

$$GS_e = h_d * l_w * A_d * S_y$$

Entre más aumente el nivel del acuífero con relación al cauce del río, mayor será la percolación hacia el cauce del río y viceversa.

**Ilustración 22. Sistema del acuífero y sus variables asociadas**

El acuífero se toma como una cuña que se supone simétrica con respecto al río, con el almacenamiento total estimado con la hipótesis que el nivel de aguas freáticas está en equilibrio con el río. De esta manera el almacenamiento en equilibrio para un lado de la cuña  $GS_e$  está dada como:

$$GS_e = h_d * l_w * A_d * S_y \quad (4.7)$$

Donde:

$h_d$  En m, representa la distancia normal que se extiende horizontalmente desde la corriente

$l_w$  en m, es la longitud mojada del acuífero en contacto con la corriente

$S_y$  es la producción específica del acuífero,

$A_d$  es la profundidad del acuífero en equilibrio.

Una estimación de la altura a la que el acuífero permanece arriba o debajo del nivel del almacenamiento de equilibrio está dado por  $y_d$ , entonces el almacenamiento inicial GS en el acuífero en  $t = 0$ , está dado por:

$$GS(0) = GS_e + (y_d * h_d * l_w * S_y) \quad (4.8)$$

La altura vertical del acuífero arriba o debajo del nivel del almacenamiento de equilibrio está dado por:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{(h_d * l_w * S_y)} \quad (4.9)$$

Entre más aumente el nivel del acuífero con relación al cauce del río, mayor será la percolación hacia el cauce del río y viceversa. La percolación total  $S$  de un lado del río ( $m^3$ /tiempo) está definido por:

$$S = (K_s * \frac{y_d}{h_d}) * l_w * d_w \quad (4.10)$$

Donde:

$K_s$  (m/tiempo) es una estimación de la conductividad hidráulica saturada del acuífero

$d_w$  (m) es una estimación del tirante en el río, el cual se supone invariante en el tiempo

El tirante junto con la longitud mojada aproxima el área a través de la cual el río y el acuífero intercambian agua. La conductividad hidráulica saturada controla la tasa a la cual el agua se mueve hacia o lejos de esta área. Una vez que la percolación se estimó, entonces la mitad del almacenamiento total del acuífero para el intervalo analizado está dado por:

$$GS(i) = GS(i-1) + (\frac{1}{2}P - \frac{1}{2}Ex - S) \quad (4.11)$$

Donde:

$E$  es la extracción del acuífero para satisfacer demandas

$R$  es la contribución de la cuenca a la recarga

$Bf(t) = \sum_{j=1}^N A_j (k_2 z_{2,j}^2)$ , y el almacenamiento total del acuífero es simplemente  $2 * GS(i)$

## *Elementos del modelo*

---

Dentro de las definiciones del modelo se cuenta con sitios de requerimiento de agua así como con sitios fuente, en el siguiente listado se expone el grafico asignado a cada sitio:

● Sitios de demanda. Es un conjunto de usuarios que comparten un sistema de distribución, se encuentran todos en una misma región definida y ocupan el mismo punto de abastecimiento. Las características necesarias para registrar un sitio de demanda son: tipo de actividad, dotación, variación mensual del consumo y porcentaje de agua que se consume, este último no afecta la cantidad de agua que se entregara al sitio, es decir solo es una cantidad de agua que sale del sistema.

→ Río. Dibuja la línea de flujo de un cauce, corre en el sentido de la flecha, la unión de un río con otro se hace especificando cual río será el tributario. Las características que se tienen que definir son: gasto, ya sea en el principio del río o describiendo el flujo en cada punto marcado sobre este, también se puede calcular con ayuda del modulo de hidrología superficial; la relación que se tiene con agua subterránea, especificando si el río recibe agua del subsuelo ó si se infiltra y se va al acuífero; la evaporación, medida en mm ó como porcentaje del flujo sobre el río; la longitud que el río que se encuentra en contacto con un acuífero.

▲ Embalse. Este sitio es considerado un punto de demanda de agua, su demanda se ve definida en su capacidad antes de la obra de excedencias, los datos básicos requeridos para usar estas estructuras son: capacidad de almacenaje, almacenaje inicial, curva volumen vs elevaciones, evaporación neta, filtración y una política de operación definida en tres niveles que son: nivel de tope (top of conservation), este es el nivel al que se encuentra la obra de excedencias; nivel de soporte (top of buffer), se define como un nivel al que se restringe la entrega de agua a los sitios de demanda; nivel de inactividad (top of inactive), es el nivel reservado para el volumen de azolves, por último se solicita un coeficiente de soporte, (buffer coefficient), que sirve para restringir la entrega de agua cuando el nivel se encuentra por debajo del buffer, mientras más cercano es a cero mas se restringe la extracción.

■ Agua subterránea. Son sitios de almacenamiento de agua, en estos nodos podemos dibujar un número ilimitado de links de abastecimiento a sitios de demanda, el usuario deberá ordenar la lista de preferencias para controlar las extracciones. Los datos solicitados en estos nodos son: capacidad de almacenaje, es la capacidad en Mm<sup>3</sup> que tiene el acuífero; almacenamiento inicial, la cantidad de agua que existe dentro del acuífero al momento de comenzar la simulación; extracción máxima mensual, este dato restringe la extracción mensual debido al diseño de la extracción; recarga natural, la cantidad de agua que entra en el periodo de tiempo de cálculo por infiltración sin considerar aumentos de nivel por agua proveniente de centros de captación; método de cálculo, especificando los flujos y relaciones con ríos o usando el modulo de simulación de relación entre agua subterránea y agua superficial.

→ Link de transmisión. Señala la unión entre los nodos de abastecimiento y las demandas finales, es necesario definir la capacidad de conducción, las pérdidas que se tienen durante la conducción, ya sea por filtraciones, evaporación o fugas. Una pérdida dentro de un link de transmisión provocara un aumento en la cantidad de agua necesaria para abastecer el sitio de demanda.

→ Link de retorno. Todo sitio de demanda debe tener un punto de descarga de agua residual o de sobrante de agua, este link se encarga de devolver esta cantidad de agua ya sea a una planta de tratamiento o directamente a algún cuerpo de agua, dentro de este también se consideran perdidas y relación con aguas subterráneas.

✦ Medidor de flujo. Son puntos colocados sobre el cauce de un río para hacer una comparación fácil y automatizada de los datos calculados por el programa y los datos históricos recopilados, no influye en ningún cálculo.

⊕ Nodo de requerimiento de flujo. Es un punto que se coloca sobre el cauce de un río y exige que pase un gasto determinado por ese punto, funciona como un sitio de demanda es decir se tiene que considerar la prioridad que tendrá.

#### 4.3.2 Descripción del modelo actual

---

El área de estudio modelada se encuentra dentro de la cuenca media del río Sonora, abarcando los acuíferos de Mesa del Seris, Bagotes, La Poza y Pesqueira; los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón se incluyeron como parte principal del modelo ya que representan el agua superficial disponible para abastecer las demandas agrícolas y parte del consumo humano.

La principal demanda que se buscó abastecer es la ciudad de Hermosillo; ésta se alimentó en primera instancia del flujo superficial de la cuenca y se complemento con las baterías de pozos de los mantos acuíferos alrededor de la ciudad.

El flujo superficial entre los embalses Molinito y Abelardo L. Rodríguez se controló modelando la política de operación de la presa Molinito, dicha política mantiene el nivel de almacenamiento de la presa Molinito en 30 Mm<sup>3</sup>, cuando se excede dicho almacenamiento se abre la obra de toma a razón de 20 m<sup>3</sup>/s; así el flujo sobre la parte del río Sonora entre ambas presas existió solamente cuando el almacenamiento en la presa Molinito supera dicho nivel ó cuando existió una avenida que llene el vaso hasta su obra de excedencias.

Se modelaron las recargas que los mantos acuíferos reciben de los ríos mediante funciones de transferencia las cuales se integraron por un link de abastecimiento, un link de retorno y una demanda ficticia; en conjunto operaron del siguiente modo: el sitio de demanda se abastece de agua constantemente si sobre el río existe flujo, el consumo de agua en el sitio modelado es cero, el agua desviada a dicho punto sale por el link de retorno que la conduce al manto acuífero recargándolo.

La relación entre algunos mantos acuíferos se simuló mediante un coeficiente de gasto que está en función del volumen de agua almacenado. Con el área del acuífero y un coeficiente de almacenamiento se calculó la altura de agua en el acuífero; con la diferencia de alturas entre los

acuíferos se obtuvo la dirección del flujo. Si un acuífero se sobre explotó el flujo hacia éste se incrementó o se decrementó hasta cambiar la dirección de la transferencia.

El sistema modelado hizo uso del recurso superficial, tanto en las demandas como en las recargas, hasta agotarlo y considerando las restricciones físicas para cada conducción; se complementa la demanda faltante con agua subterránea. El modelo permite analizar diferentes políticas de operación para el abastecimiento de las demandas dentro del área de estudio y observar el impacto que estas tendrán, en el recurso hídrico, con diferentes periodos de aplicación.

### *Descripción del modelo*

En la figura esquema general del modelo se muestra el arreglo de las estructuras que componen el modelo WEAP; el área de modelación se dividió en cuenca media alta (CMA) y cuenca media baja (CMB). La CMA incluye a los cauces de los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón; desde las estaciones hidrométricas el Cajón y el Orégano hasta la presa Abelardo L. Rodríguez. La CMB abarca desde Hermosillo y la planta de tratamiento de agua residual hasta la salida del modelo en Siete Cerros.

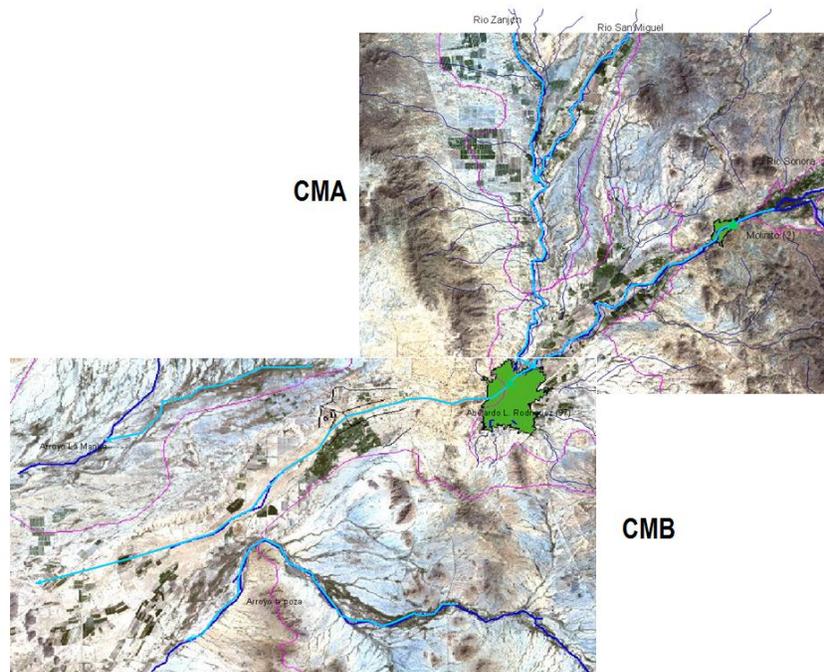


Ilustración 23. Cuenca media alta (CMA) y cuenca media baja (CMB)



La parte media que se utiliza como pivote para cambiar de sección se compone de dos estructuras principales del modelo que son: la ciudad de Hermosillo y la presa Abelardo, estos dos puntos sirvieron como estructuras de control para diferenciar los balances de la CMA y la CMB; funcionó considerando el gasto que sale de la presa Abelardo y el agua que va a la planta de tratamiento de agua residual después de la ciudad de Hermosillo como una entrada a la CMB.

La cuenca media consideró como entradas de agua a la zona el gasto del río Zanjón calculado con un modelo de lluvia escurrimiento, los gastos de los ríos San Miguel y Sonora obtenidos de las estaciones hidrométricas El Cajón y El Orégano.

Sobre el río Zanjón previo a su unión con el río San Miguel se modeló una zona agrícola que se abasteció en su totalidad del acuífero Pesqueira, éste cuenta con una recarga de agua superficial del río Zanjón, modelada de manera puntual a razón de  $0.5 \frac{m^3}{s}$ ; permitiendo el gasto sobre el río Zanjón, después de la recarga al acuífero, solo cuando el escurrimiento es mayor a  $0.5 \frac{m^3}{s}$ . El acuífero de Pesqueira se simuló con un link que le permite abastecer a la ciudad de Hermosillo.

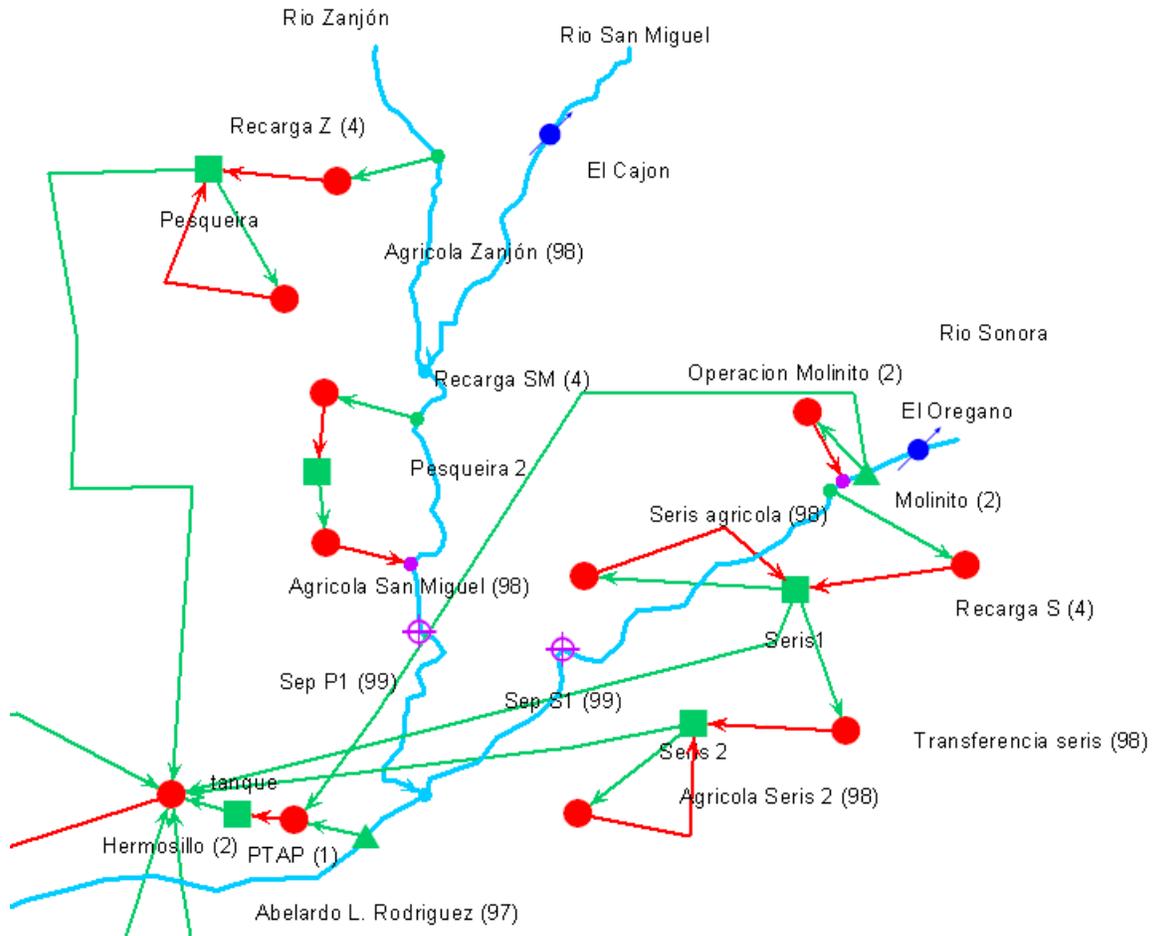
La siguiente sección del modelo representa la unión del río San Miguel y el río Zanjón, pasando esta unión se simuló un acuífero pequeño llamado Pesqueira 2, teniendo como principal objetivo simular la infiltración de agua después de la unión de ambos ríos; éste acuífero alimenta una zona agrícola y se recargó con el agua infiltrada del río Zanjón, el agua residual de la zona agrícola retorna al flujo del río. La infiltración se simuló de manera puntual con un gasto máximo de  $1.5 \frac{m^3}{s}$ . El río termina en el almacenamiento Abelardo L. Rodríguez.

Sobre el cauce del río Sonora después de la estación hidrométrica el Orégano se simuló la presa Molinito y el acuífero de Mesa del Seri, esta sección del río termina en la entrada a la presa Abelardo.

En la presa molinito se simuló una política de operación que derramó agua de la presa cuando el almacenamiento llegó a 30 Mm<sup>3</sup> a razón de  $20 \frac{m^3}{s}$ .

El acuífero Mesa de Seris fue dividido en dos pequeños acuíferos analizando los abatimientos que se encontraron en éste; se programó una función de transferencia que controló el flujo entre estos acuíferos en función del almacenamiento en cada uno de ellos. Cada parte del acuífero Mesa de Seris abasteció una zona agrícola, además la parte baja del Seris abasteció a la ciudad de Hermosillo.

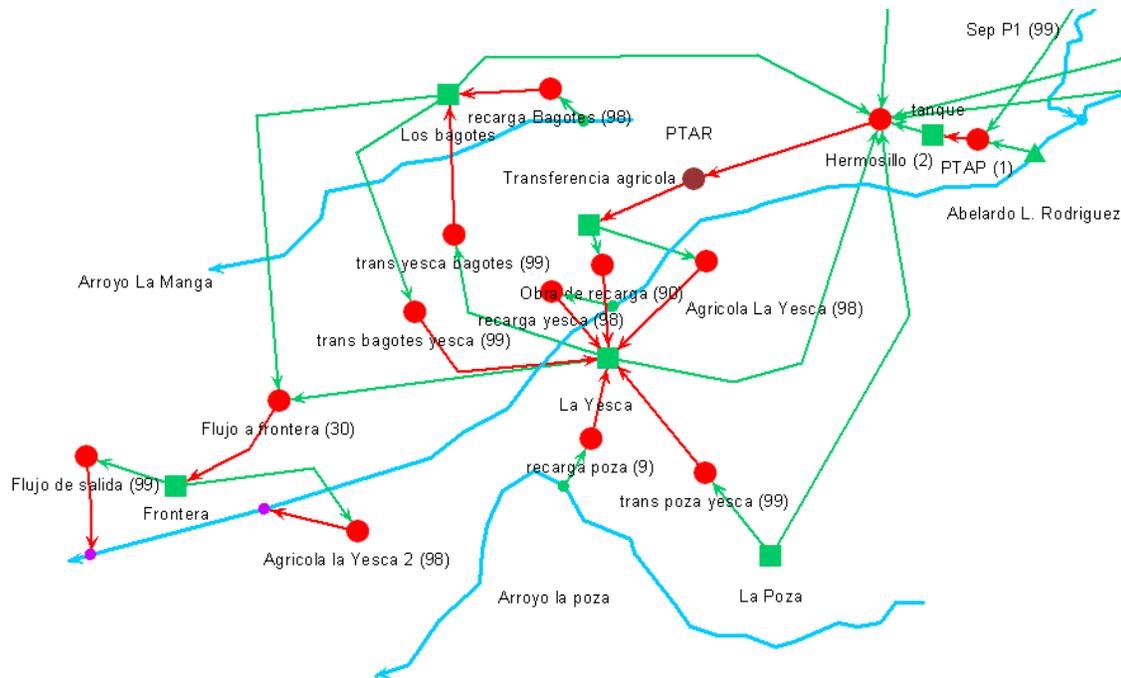
Entre las presas Abelardo y Molinito el río Sonora es altamente permeable y se sabe que para que el flujo llegue a la presa Abelardo el gasto a la salida de Molinito tiene que ser mayor a  $8 \frac{m^3}{s}$ , por lo que se simuló la recarga natural por infiltración en dicho tramo de manera puntual una recarga a razón de  $8 \frac{m^3}{s}$ .



**Ilustración 25. Cuenca media alta del río Sonora (CMA)**

En la cuenca media baja del río Sonora, se modeló la parte final del río Sonora y los acuíferos de Bagotes, La yesca y La Poza, las entradas de recurso hídrico consideradas son: los arroyos de La Poza y la Manga, el agua residual de la ciudad de Hermosillo y el flujo sobre el cauce del río Sonora bajo la presa Abelardo.

Esta zona se modeló sobre el cauce del río Sonora comenzando en la descarga de la presa Abelardo y siguiendo el cauce hasta la zona de siete cerros después de la zona agrícola de la Yesca; cercano a esta zona agrícola se simuló un acuífero llamado La Yesca; éste acuífero se recargó por medio de agua superficial del arrollo de la Poza y del río Sonora, se recargó de por medio de agua subterránea del acuífero de la Poza. El acuífero de la Yesca se simuló con capacidad para abastecer agua a la ciudad de Hermosillo.



**Ilustración 26. Cuenca media baja del río Sonora (CMB)**

El acuífero de los Bagotes, simulado en la zona denominada la Manga, se recarga de manera superficial del arroyo la Manga, abastece a la ciudad de Hermosillo de manera casi permanente con una capacidad máxima de 1 m<sup>3</sup>/s.

Se modeló una relación entre el acuífero de Bagotes y La Yesca; simulando la interacción entre ellos se programó una función de transferencia con la capacidad de permitir el flujo de un acuífero a otro dependiendo la cantidad de agua almacenada en los acuíferos, así se observó la evolución en el tiempo de la cantidad de agua almacenada en estos dos acuíferos y los cambios en la dirección del flujo. Ambos acuíferos alimentan un sitio de demanda ficticio, que simuló la salida subterránea del modelo, llamado Flujo a frontera; ésta demanda entrega el agua al acuífero Frontera en el que se puede hacer el balance del agua subterránea a la salida del modelo en la zona de Siete Cerros.

La relación entre los acuíferos La Yesca y Bagotes se muestra en la Figura 13.5, la interacción entre estos acuíferos, el flujo de salida y el abastecimiento a la ciudad de Hermosillo permitieron modelar a escala el efecto puntual de una sobre explotación en el acuífero de los Bagotes así como el impacto de ésta explotación en el flujo subterráneo en la parte final del modelo.

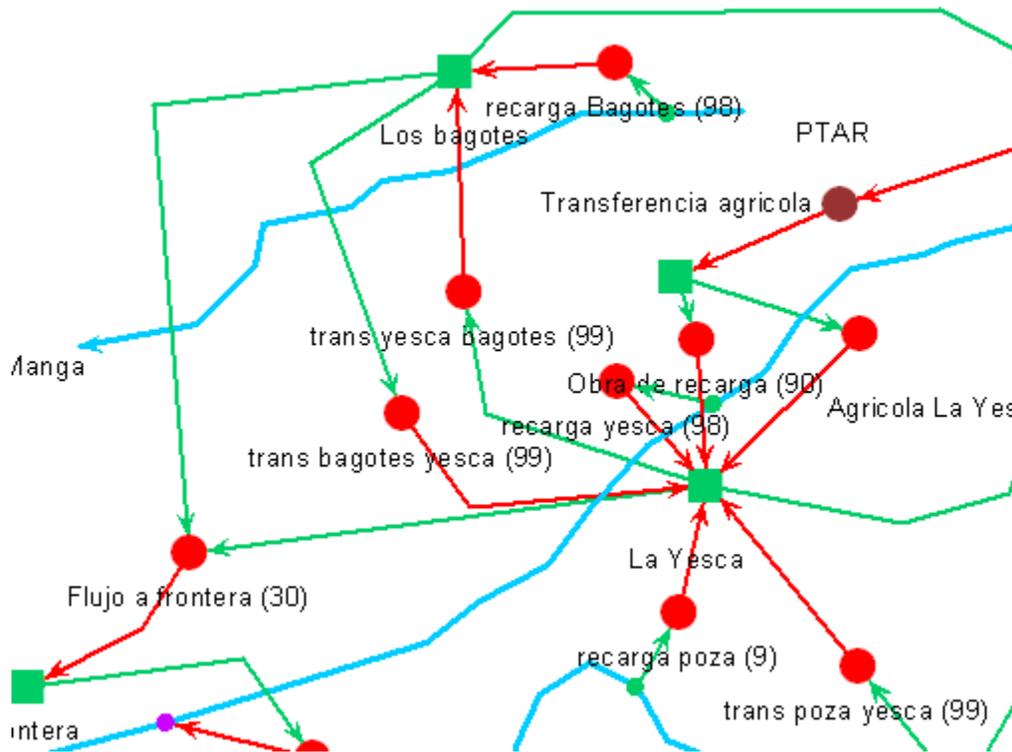


Ilustración 27. Interacción entre los acuíferos la Yesca y los Bagotes

El flujo final, en la salida de la zona de estudio, es alimentado por los acuíferos la Yesca y Bagotes; un acuífero llamado frontera se utilizó para cuantificar el gasto de salida del modelo. La demanda flujo de salida extrajo toda el agua del acuífero frontera.

#### 4.3.3 Descripción de variables de decisión

Política de operación de la presa Molinito. Se modeló una política que permite almacenar 30 Mm<sup>3</sup> de agua en el vaso de la presa, una vez cubierta esta capacidad se descargó agua al río Sonora a razón de 20 m<sup>3</sup>/s, las modificaciones a esta variable se realizaron en la capacidad de descarga de la presa utilizando los valores: 8 m<sup>3</sup>/s, 16 m<sup>3</sup>/s y 20 m<sup>3</sup>/s.

Capacidad de infiltración en el tramo del río Sonora entre las presas Molinito y Abelardo. La capacidad de infiltración que se modeló inicialmente fue 8 m<sup>3</sup>/s, ésta se modificó a 16 m<sup>3</sup>/s y 20 m<sup>3</sup>/s.

Preferencia de extracción de agua para abastecer la ciudad de Hermosillo. Se modeló utilizando dos listas de preferencia para ambas listas de preferencia la primera fuente de abastecimiento es el agua superficial; la primera lista que se modeló extrae, después de agua superficial, agua de los acuíferos Bagotes y la parte baja de mesa del Seris en tercer lugar extrae de la parte alta de mesa del Seris y el acuífero de Pesqueira, por último se utilizó el acuífero de la Poza. En la segunda lista se modifica la extracción y se busca abastecer la ciudad de Hermosillo de la cuenca media baja y después de la cuenca media alta; los Bagotes y la Yesca, Seris1 Seris2 y Pesqueira, La poza.

Recarga artificial controlada en la zona del acuífero la Yesca. Se modeló una zona de recarga artificial controlada en el acuífero de la Yesca, con esta recarga se restringió el abastecimiento a la zona agrícola de la Yesca incrementando, en volumen, la cantidad de agua infiltrada al acuífero; las tres variaciones modeladas son: sin recarga controlada, abasteciendo 22 Mm<sup>3</sup> anuales a la zona agrícola e infiltrando el resto del agua que proviene de la planta de tratamiento de agua residual y por último infiltrando el total del agua proveniente de la planta de tratamiento de agua residual.

Restricción de abastecimiento a zonas agrícolas de la cuenca media alta. La sobre explotación de los acuíferos de la cuenca media alta es en gran parte debida a la extracción agrícola, se modeló un escenario que restringió la extracción en función del volumen almacenado en un acuífero; así si el almacenamiento en el acuífero del que se abastece la demanda agrícola se ha reducido un 5% la extracción máxima hacia dicha demanda agrícola se reduce un 15%.

Incremento de demanda de la ciudad de Hermosillo. Se modeló considerando la demanda a la ciudad de Hermosillo constante y después incrementando la demanda 1.7% anual con lo que se puede estimar la cantidad de agua que es posible abastecer en un periodo futuro de 25 años a la ciudad de Hermosillo.

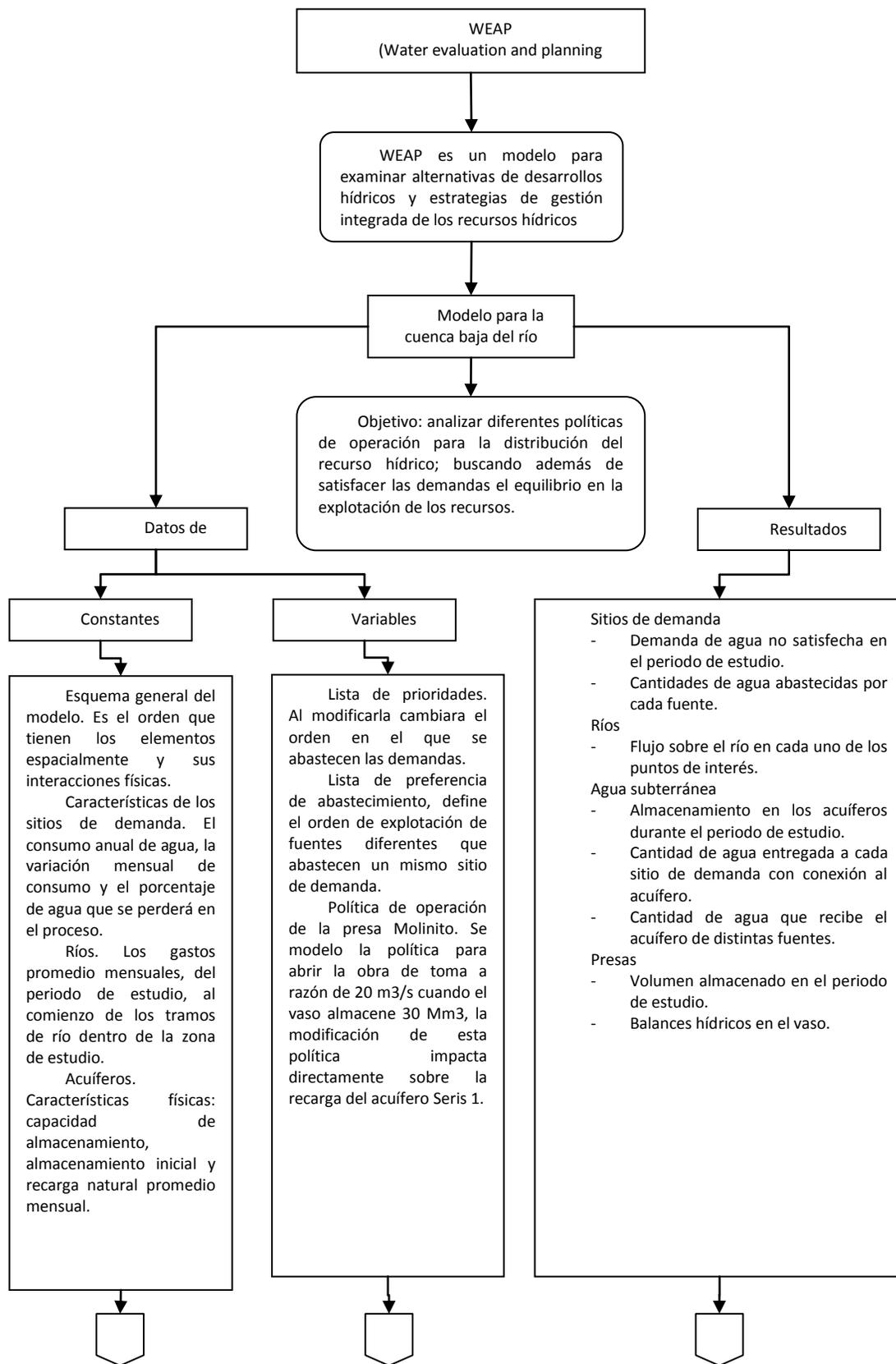
Cambio climático. Se consideró un incremento de 3 grados en la temperatura por lo que se modeló con una reducción del caudal del 30% y un incremento de evaporación en vasos del 15%.

Debido a que se cuenta con información histórica de 125 años cada escenario de modelación se trabajó en cinco periodos de 25 años; la diferencia entre cada periodo se encuentra en los hidrógrafas de entrada en los ríos.

La combinación de la variación de los elementos de decisión deja un número muy grande de escenarios posibles por lo que en una primera fase fueron identificadas las variables de mayor interés para el estudio pudiendo así reducir el número de variaciones en los datos para reducir el mosaico de resultados.

Finalmente las variables de decisión elegidas para las modelaciones finales fueron:

- Recarga artificial en la zona del acuífero de la Yesca
- Restricción al abastecimiento de zonas agrícolas
- Incremento de demanda en la ciudad de Hermosillo
- Cambio climático





Ligas de unión entre los elementos. Las uniones o links necesitaron un flujo máximo permitido y editar una lista de preferencias de abastecimiento, esta lista define el orden de explotación de cada fuente en cada sitio de demanda.

Presas. Las características físicas: capacidad de almacenamiento, almacenamiento inicial, la de curva volumen contra elevación y evaporación neta. Las características operacionales definidas por los niveles: de operación, de soporte y de azolves.

Coefficiente de gasto de transferencia. Se calibró con las características físicas de cada acuífero, permeabilidad, coeficiente de almacenaje y el factor  $L_s/L$ .



Link de unión entre el río Sonora y el sitio de demanda Recarga S. Una modificación en el flujo máximo permitido en este link simula una modificación en la capacidad de infiltración en el tramo del río Sonora ubicado entre las presas Molinito y Abelardo.

Capacidad de la planta de tratamiento de agua potable. Incrementaría o reduciría la capacidad de Hermosillo para aprovechar el recurso superficial.

Demanda de agua de la ciudad de Hermosillo. Modificando este dato se buscó la cantidad de agua que se puede entregar a la ciudad teniendo el equilibrio en las fuentes de abastecimiento.



Comportamiento en el tiempo de los almacenamientos subterráneos. Usando periodos de 25 años y con el registro de gastos medios mensuales; se observó el desarrollo del nivel de almacenamiento en los acuíferos.

Sobre explotación de los acuíferos. Modificando la capacidad de infiltración en algunos acuíferos y la política de operación de la presa Molinito; se observó la variación del nivel de sobre explotación de los acuíferos manteniendo constante el nivel de consumo de agua en periodos de 25 años.

#### 4.3.4 Datos de entrada

##### *Sitios de demanda*

Los datos necesarios para programar un sitio de demanda son básicamente: consumo anual total en unidades de volumen; el consumo de agua en el sitio de demanda como porcentaje del total abastecido en cada instante, este porcentaje saldrá del sistema; variación mensual, como porcentaje del consumo anual total.

**Tabla 8. Tabla de datos en sitios de demanda**

Sitio de demanda	Consumo anual	Agua consumida	Variación mensual											
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Mm3	%	%											
Hermosillo	102	38	7.1	7.0	7.7	7.7	9.4	9.2	9.5	9.4	8.6	9.0	8.1	7.2
Agrícola La Yesca	35	36	4.2	2.8	4.8	6.4	10.4	13.5	15.6	15.8	8.4	6.6	6.8	4.7
Agrícola Zanjón	34	100	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Seris agrícola	19	100	4.2	2.8	4.8	6.4	10.4	13.5	15.6	15.8	8.4	6.6	6.8	4.7
Agrícola San Miguel	11	100	4.2	2.8	4.8	6.4	10.4	13.5	15.6	15.8	8.4	6.6	6.8	4.7
Agrícola Seris 2	22	100	4.2	2.8	4.8	6.4	10.4	13.5	15.6	15.8	8.4	6.6	6.8	4.7
Agrícola la Yesca 2	30	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5

##### *Agua superficial*

Para los ríos y arroyos modelados se requirió de los gastos históricos en su tramo modelado, los datos fueron ingresados a nivel mensual. Los datos del río San Miguel fueron tomados de la estación hidrométrica el cajón, los gastos del río Sonora se obtuvieron de la estación hidrométrica el orégano, los gastos del río Zanjón y los arroyos de la Manga y la Poza fueron generados con la ayuda de modelos de simulación lluvia escurrimiento. Ver anexo A.

##### *Agua subterránea*

Las características físicas de los acuíferos que se requieren son la capacidad total, el almacenamiento inicial y la recarga natural.

Se modeló la transferencia entre acuíferos y para estas fueron necesarios los datos de área (A), la capacidad inicial convertida a una altura inicial ( $h_i$ ), el coeficiente de almacenaje (S) y la longitud de conexión entre acuíferos ( $L_s$ ) y la capilaridad del acuífero, para esta última se utilizó el valor común de  $k=1.56$  m/día.

**Tabla 9. Características de los acuíferos**

Acuífero	Capacidad	Alm. Inicial	Recarga natural	Área	$h_i$	S	$L_s$	d
	Mm3	Mm3	Mm3/año	km2	m		km	Km
Seris1	500	286.70		93.99975	61	0.05	7	0.14
Seris 2	1000	846.00		281.99925	60	0.05	7	0.14
La Poza	3000	-						
Los bagotes	6000	5,255.62		1480.45725	71	0.05	8	0.11
Pesqueira	2500	1,787.50		715	50	0.05		
La Yesca	2500	1,727.20		493.48575	70	0.05	8	0.11
Pesqueira 2	1000	290.00		116	50	0.05		

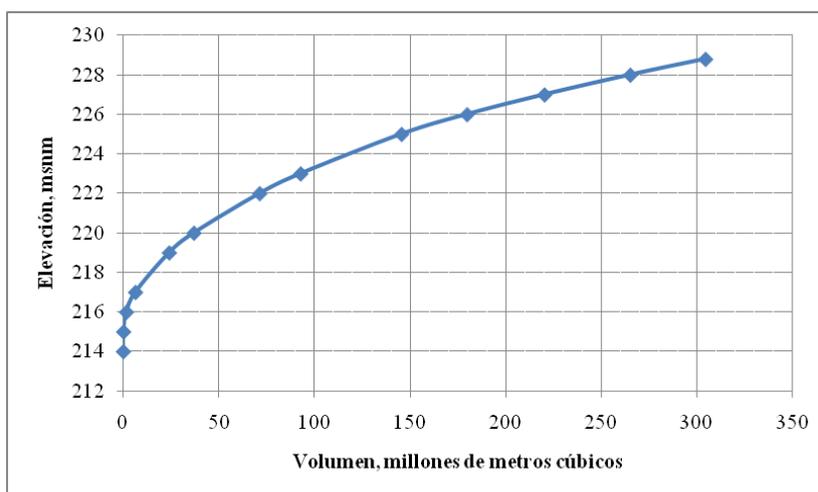
## Embalses

Las características físicas mostradas en la tabla corresponden a las programadas en el modelo de acuerdo a las características reales de cada embalse, las definiciones de los niveles de conservación, buffer, inactive y buffer coeficient se encuentran en apartado dedicado a la operación de cada elemento.

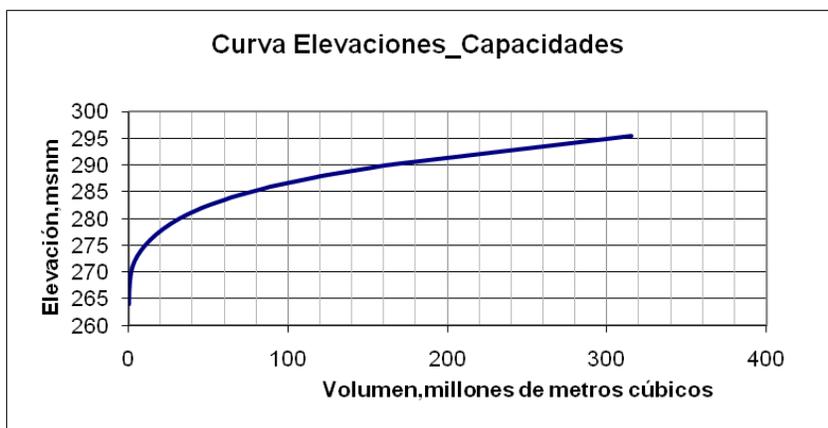
**Tabla 10. Características de los reservorios**

Características de almacenamientos superficiales						
Presa	Capacidad	Inicial	Conservación	Buffer	Inactive	B coef
	Mm3	Mm3	Mm3	Mm3	Mm3	
Molinito	259.06	30	200		5	
Abelardo L. Rodríguez	304.57	105	210	30	15	0.25

Las curvas elevación vs capacidades mostradas en las siguientes figuras se programaron dentro del modelo para poder realizar los balances hidráulicos en los embalses.



**Ilustración 28. Curva elevaciones capacidades de la presa Abelardo**



**Ilustración 29. Curva elevaciones capacidades de la presa Abelardo**

### 4.3.5 Sistema de prioridades

Para decidir cuál será la demanda que se satisface primero ó tiene preferencia sobre las demás WEAP utiliza un sistema de prioridades; este consiste en una numeración del 1 al 99 considerando más importante el 1, la distribución de agua entonces será primero para los sitios de demanda que tengan la prioridad más alta y después para los de prioridad baja. Cuando dos sitios tengan el mismo número asignado la cantidad de agua entregada a estos sitios será, en porcentaje de su dotación, la misma.

Los embalses tienen también un número de prioridad, se recomienda que tengan la más baja posible para evitar que el reservorio almacene agua si no es necesario.

**Tabla 11. Tabla de prioridades para el modelo de la cuenca media del río Sonora**

Sitio	Prioridad	Sitio	Prioridad
PTAP	1	Seris agricola	98
Hermosillo	2	Agricola Seris 2	98
Operacion Molinito	2	Agricola San Miguel	98
Recarga Z	4	recarga yesca	98
Recarga S	4	Agricola la Yesca 2	98
Recarga SM	4	recarga Bagotes	98
recarga poza	9	trans poza yesca	99
Flujo a frontera	30	trans bagotes yesca	99
Obra de recarga	90	trans yesca bagotes	99
Agricola Zanjón	98	Flujo de salida	99
Agricola La Yesca	98	Molinito	2
Transferencia seris	98	Abelardo L. Rodriguez	97

Las prioridades del modelo se pueden distinguir en cuatro niveles: primero abastecer agua a la ciudad de Hermosillo, para esto se utilizó una demanda ficticia que representa la planta de tratamiento de agua potable PTAP; la política de operación de la presa Molinito se simulo utilizando un sitio de demanda que simula la obra de toma por lo cual su prioridad es alta; el siguiente nivel de prioridades lo toman las recargas de los acuíferos; por último las funciones de transferencia y las zonas agrícolas.

### 4.3.6 Operación de cada elemento

#### *Sitios de demanda*

Los sitios de demanda se modelan con demandas anuales constantes, variaciones mensuales de consumo de acuerdo a cada actividad desempeñada en éstos y un nivel de consumo acorde con cada sitio.

Las pérdidas dentro de los links de abastecimiento, ya sean por fugas, extracciones ilegales, etc., afectan directamente la cantidad de agua que demanda el sitio de abastecimiento incrementándola, por lo que se debe modelar solo la dotación.

El nivel de consumo esta expresado en porcentaje de la dotación entregada al sitio de demanda, este sale del sistema y no incrementa la dotación, para Hermosillo dentro de este porcentaje se consideran pérdidas por fugas, evaporación y consumo por riego de áreas verdes.

La variación de consumo mensual en cada demanda se expresa como una serie de tiempo donde a cada mes se le asigna un porcentaje del total anual de agua que se le entregara al nodo, es diferente para los sitios de consumo humano y para las zonas de riego, existen meses en los que la zona de riego no requiere agua y meses en los que los nodos de consumo humano requieren una mayor cantidad.

## Hermsillo

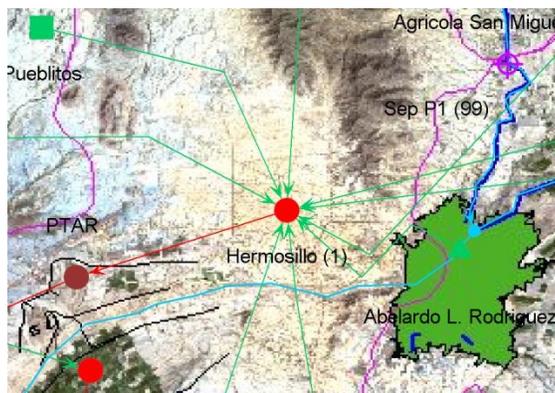


Ilustración 30. Sitio de demanda Hermsillo

Para Hermsillo se entrega agua de ocho puntos diferentes, teniendo un solo canal de salida de agua residual que directamente la dirige a una planta potabilizadora, el listado de preferencias de abastecimiento, nos permite identificar el orden de las fuentes de abastecimiento, la cantidad máxima de agua traída de cada fuente está delimitada por características físicas como su capacidad de conducción.

Tabla 12. Lista de preferencias de abastecimiento en Hermsillo

Abastecimiento de Hermsillo		
Fuente	Flujo máximo	Preferencia
	m <sup>3</sup> /s	
Molinito	2.5	1
Abelardo L. Rodríguez	2.5	1
Los bagotes	0.9	2
Seris 2	1.3	3
Pesqueira	0.3	4
Seris1	0.7	5
La Poza	0.3	5
La Yesca	0	5

El modelo busca agotar primero los recursos superficiales y después asigna recursos subterráneos, de esta forma Hermsillo primero usa agua de los dos almacenamientos superficiales y después recibe el agua de acuíferos.

## Acuíferos

Los acuíferos que fueron considerados en el modelo son: La poza, Pesqueira, Bagotes, Seris y la Yesca, otros acuíferos simulados son utilizados como soporte, por ejemplo Transferencia agrícola se utiliza para enviar toda el agua de la planta de tratamiento de agua residual a la zona de riego de la Yesca ó a las lagunas de infiltración.

En cada extracción se programo una restricción al flujo de salida, cuando la cantidad de agua dentro del almacenamiento se encuentra bajo el 75% de su capacidad total el flujo de extracción disminuye un 25%, esto con el fin de incrementar la dificultad de extracción en los acuíferos.

Para poder diferenciar las recargas del Río Zanjón y del San Miguel al acuífero de Pesqueira se dividió el acuífero en Pesqueira y Pesqueira 2, ambos tienen una zona de riego asignada y solo Pesqueira entrega agua a Hermosillo.



Ilustración 31. Modelación de acuífero Pesqueira

Para el acuífero de Seris se modeló el abatimiento en la parte baja del acuífero, creando una nueva demanda que realizó una función de transferencia; programada para requerir agua de Seris1 cuando tenga un nivel mayor al de Seris2 la transferencia envió agua al acuífero Seris2, cada parte del acuífero alimenta una zona agrícola y ambos abastecen a Hermosillo.



Ilustración 32. Sistema modelado en el acuífero Seris



Ilustración 33. La recarga natural en el acuífero Pesqueira

Para simular la recarga de agua superficial natural de acuíferos se crearon sitios de demanda ficticios, éstos sitios tienen un consumo de cero, por lo que, el agua pasa directamente al link de desecho llegando al acuífero.

Se usaron tres simulaciones de este tipo, dos en la zona del acuífero Pesqueira y uno más para la recarga del Seris, la demanda de agua de cada sitio se propuso pensando que ésta tendrá siempre la necesidad de agua y se limitó el link que la abastece así se controla la cantidad de agua que se infiltró al acuífero, para Seris se consideró un flujo de 8 m<sup>3</sup>/s, así el flujo que pase por debajo de 8 m<sup>3</sup>/s se quedara en el acuífero y el resto continuara.



Ilustración 34. Sistema de recarga del acuífero pesqueira

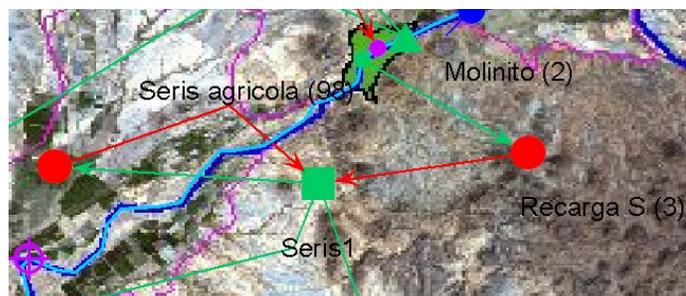


Ilustración 35. Recarga en el acuífero Seris1

## Embalses

Las políticas de operación en WEAP se definen en tres niveles de almacenamiento de agua dentro de un embalse y un coeficiente de soporte; primero el Top of conservation es el nivel al que se encontraría la obra de excedencias; el Top of buffer es el nivel que limita la extracción, debajo de este las entregas de agua son restringidas es decir se trata de mantener este volumen de agua; por último el Top of inactive, este es el nivel del volumen destinado para azolves.



Ilustración 36. Niveles de almacenamiento en vasos para efectos de modelación

La presa Abelardo tienen las siguientes características: Capacidad de almacenamiento de 300 Mm<sup>3</sup>, un top of conservation a 210 Mm<sup>3</sup>, top of buffer a 30 Mm<sup>3</sup> y top of inactive a 15 Mm<sup>3</sup> y una extracción máxima de 2.5 m<sup>3</sup>/seg hacia la planta de tratamiento que alimenta Hermosillo.

La política de operación modelada en la presa Abelardo se definió de la siguiente manera: cuando se almacenó agua esta se envió a la ciudad de Hermosillo y cuando rebasó los 210 Mm<sup>3</sup> de almacenamiento, la presa derramó agua por su obra de excedencias, la evaporación es muy importante llegando a tener hasta 373 mm de evaporación mensual dentro del vaso.

La presa Molinito tiene una política de operación que permitió el almacenamiento de hasta 30 Mm<sup>3</sup>, cuando este fue superado se abre la obra de toma a razón de 20 m<sup>3</sup>/seg, también se tiene una extracción hacia Hermosillo máxima de 2.5 m<sup>3</sup>/seg, se considero la obra de excedencias a 200 Mm<sup>3</sup> almacenados y una capacidad de azolves de 5 Mm<sup>3</sup>.

Para simular la operación se creó una demanda ficticia, con un porcentaje de consumo cero, que exigió agua durante todo el año; se restringió el link de abastecimiento de manera que solamente cuando se excedían los 30 Mm<sup>3</sup> de almacenamiento permita el paso de agua a razón de 20 m<sup>3</sup>/seg y descarga al Río Sonora; la obra de excedencias se encuentra en los 200 Mm<sup>3</sup>.



Ilustración 37. Modelación de operación de la presa Molinito

#### 4.3.7 Simulaciones especiales

##### *Gasto de transferencia*

Para la transferencia entre acuíferos se utilizó una ecuación de flujo de agua subterránea basada en la ley de Darcy; expresa la velocidad del flujo en función de la permeabilidad del acuífero, con esta velocidad multiplicada por el área de transferencia se obtuvo un gasto de transferencia, esta ecuación se puede dejar en función de las diferencias de alturas de agua en los acuíferos teniendo así el factor de gasto que se programara en cada link de transferencia.

Ley de Darcy:

$$v = k * \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (4.12)$$

Donde:

v; Velocidad

k; Permeabilidad

$\frac{\Delta h}{\Delta L}$ ; Gradiente entre acuíferos

Según recomendación del Soil Conservation Service de los Estados Unidos la permeabilidad se clasifica como se muestra en la tabla 12.

Tabla 13. Valores propuestos para el coeficiente de permeabilidad k

	Muy lenta	Lenta	Moderadamente lenta	Moderada	Moderadamente elevada	Elevada	Muy elevada
K (cm/h)	< 0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,5	6,5 – 12,5	12,5 – 25,0	> 25,0

El volumen de agua almacenado en un acuífero depende del tamaño del acuífero y del coeficiente de almacenamiento, el coeficiente de almacenamiento indica cuanto del volumen total del acuífero es agua.

Volumen de almacenaje en acuíferos:

$$V = h * A * S \quad (4.13)$$

Donde:

V; Volumen

h; Altura

A; Área

S; Coeficiente de almacenamiento

El modelo WEAP entrega resultados a nivel mensual del almacenamiento en los acuíferos con los cuales se puede calcular la altura que se tiene en cada uno para obtener la diferencia de niveles entre los acuíferos.

Despejando la altura de la formula de volumen:

$$h = \frac{V}{A*S} \quad (4.14)$$

Con la diferencia de alturas calculada se define la dirección del flujo, el siguiente cálculo es el gasto que se permite pasar por la transferencia.

Al multiplicar la ecuación de Darcy por el área transversal de la unión entre los dos acuíferos tendremos el gasto de transferencia.

Gasto de transferencia:

$$Qt = \frac{Ls}{L} * h * k * \Delta h \quad (4.15)$$

Donde:

Qt; Gasto de transferencia [m<sup>3</sup>/s]

Ls; Longitud de conexión entre acuíferos [Km]

h; Altura de transferencia [m]

k; permeabilidad [m/s]

$\frac{\Delta h}{L}$ ; Gradiente entre acuíferos [m/km]

El gradiente  $\frac{\Delta h}{L}$  es la relación entre la pérdida de elevación y la distancia en la que ocurre, el cálculo de la  $\Delta h$  se explico anteriormente y la longitud para facilitar el cálculo se estima en 1 km, para calibrar el modelo se utilizó el parámetro Ls/L.

La distancia Ls se midió con una imagen satelital y el programa Autocad.

La altura h que se consideró para el cálculo del gasto corresponde a la mayor entre ambos acuíferos.

Diferencia de elevaciones:

$$\Delta h = \frac{V1}{A1*S} - \frac{V2}{A2*S} \quad (4.16)$$

Sustituyendo la expresión anterior en el gasto de transferencia:

$$Qt = \frac{Ls}{L} * \frac{V1}{A1*S} * k * \left( \frac{V1}{A1*S} - \frac{V2}{A2*S} \right) \quad (4.17)$$

Esta expresión sirve para calcular el valor del gasto en función de los volúmenes en ambos acuíferos.

En la figura siguiente se describen las dimensiones requeridas para el cálculo del gasto de transferencia, el nivel del fondo se consideró como el mismo para todos los casos de transferencias programadas.

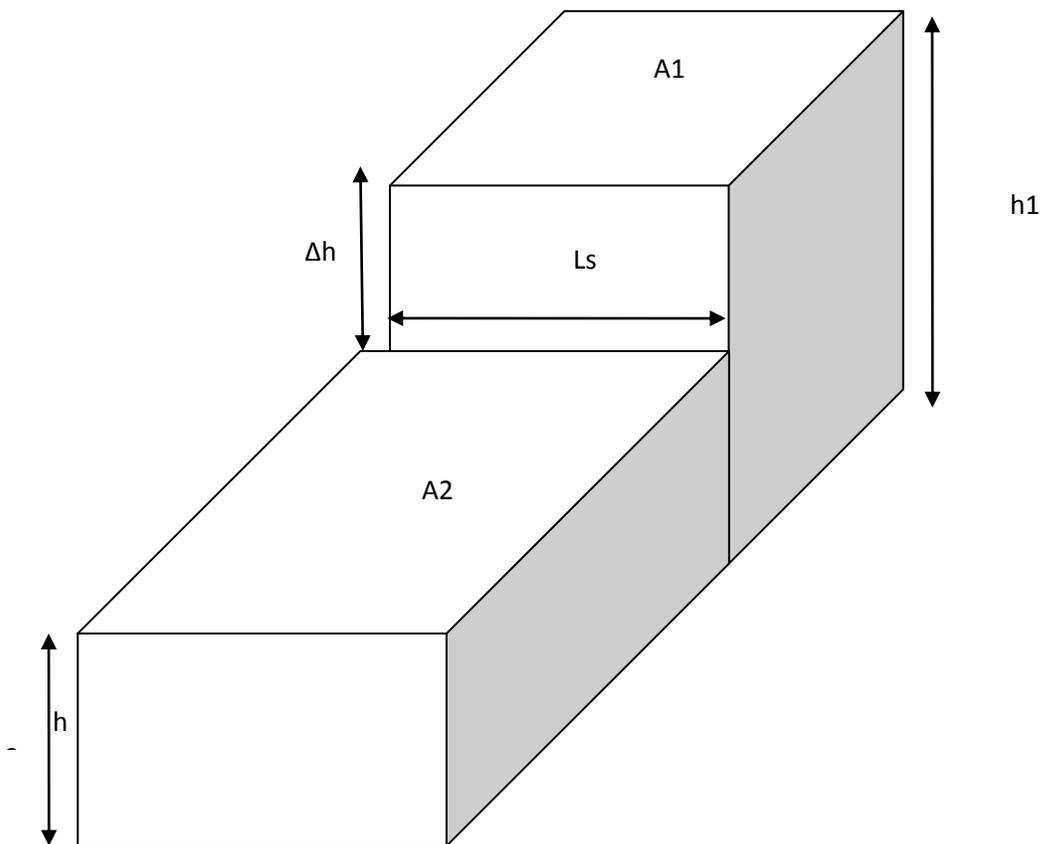


Ilustración 38. Dimensiones de acuíferos para efectos de modelación

## Optimación de la política de operación de la presa Molinito y la capacidad de infiltración sobre el río Sonora

La política de operación de la presa Molinito permite almacenar hasta 30 Mm<sup>3</sup> de agua en el vaso, después de esto la obra de toma se abre y el agua se libera río abajo, en ésta sección del río Sonora la permeabilidad natural permite recargar el manto acuífero de Mesa de Seri; para aprovechar el flujo de agua liberado se propuso incrementar la capacidad de infiltración y controlar el gasto liberado por la presa, una de las primeras conclusiones de éste análisis es que la capacidad de infiltración y la cantidad de agua liberada deben tener el mismo valor, o uno muy cercano; la capacidad de la obra de toma permite liberar 20 m<sup>3</sup>/s de agua y la capacidad de infiltración en el río Sonora es de 8 m<sup>3</sup>/s.

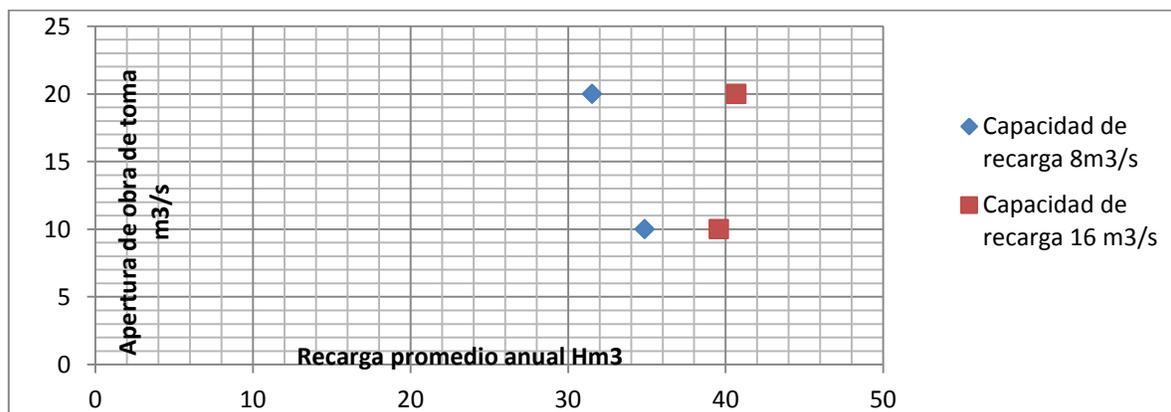
El periodo que se eligió para el modelado de éstas características es enero 1992 a diciembre 2010; ya que el modelo se calibro en el mismo periodo fue posible comparar los datos históricos de escurrimiento superficial contra los simulados por el modelo.

Como resultado de esta simulación se obtuvo el volumen de agua que se aprovecha, infiltrándolo en el acuífero, concluyendo que mientras más cercanos sean los valores de la capacidad de infiltración y la apertura de la obra de toma el aprovechamiento será mayor.

**Tabla 14. Valores de infiltración vs capacidad de recarga y capacidad de infiltración**

Capacidad de recarga	Capacidad de recarga en 8 m <sup>3</sup> /s		Capacidad de recarga en 16 m <sup>3</sup> /s	
Obra de toma m <sup>3</sup> /s	10	20	10	20
	Infiltración Hm <sup>3</sup>	Infiltración Hm <sup>3</sup>	Infiltración Hm <sup>3</sup>	Infiltración Hm <sup>3</sup>
Σ total de simulación	628	568	713	732
Promedios anuales	35	32	40	41

En el siguiente grafico se muestra la cantidad de agua que se recarga al acuífero modificando la capacidad de infiltración y la apertura de la obra de toma; en la primera serie la capacidad de recarga tiene un valor de 8 m<sup>3</sup>/s y el valor máximo de infiltración promedio, 34.8 Hm<sup>3</sup>/año, se obtuvo para la apertura de la obra de toma en 10 m<sup>3</sup>/s; en la segunda serie con una capacidad de recarga de 16 m<sup>3</sup>/s el valor de infiltración de 40.6 Hm<sup>3</sup>/año es el máximo y se presentó con la obra de toma abierta al máximo.



**Ilustración 39. Infiltración promedio anual bajo la presa Molinito**

Duplicando la capacidad de recarga y con la obra de toma abierta al máximo el aprovechamiento promedio en el periodo se incrementa en 5 Mm3/año, sin embargo si analizamos la infiltración en el tiempo, la capacidad de recarga incrementada solo se aprovecha en cuatro picos de lluvias extremas. Por esta razón se tomaron los valores de 10 m3/s como la infiltración y 10 m3/s para la obra de toma.

### *Demandas de apoyo*

Las demandas de apoyo son sitios utilizados para el análisis de las políticas de operación de interés; se utilizaron estos sitios para las transferencias entre acuíferos, la recarga entre acuíferos, la política de operación de Molinito y el flujo de salida del modelo.

Los sitios de demanda de apoyo no tienen consumo de agua, simplemente funcionan como estructuras de conexión entre elementos; en estos sitios es posible controlar la cantidad de flujo que pasa por ellos por esto se utilizó éste sistema para modelar políticas de operación de diferentes elementos.

La variación mensual tampoco se modificó así la cantidad de agua diaria que el sitio solicitó fue constante, con esto y las restricciones en los links de abastecimiento se controlaron las políticas de abastecimiento para cada elemento.

**Tabla 15. Datos de entrada en las demandas de apoyo**

Sitios de modelación especial	Consumo anual Mm3	Agua consumida %	Variación mensual											
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
			%											
Transferencia seris	500	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga Z	150	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga S	750	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Operación Molinito	900	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga Poza	300	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
PTAP	79	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
trans poza yesca	8	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Obra de recarga	60	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga yesca	300	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
trans bagotes yesca	30	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
trans yesca bagotes	30	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga SM	60	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Flujo de salida	60	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Recarga Bagotes	300	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5
Flujo a frontera	60	0	8.5	7.7	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5	8.5	8.2	8.5	8.2	8.5

### *Restricción en zonas agrícolas*

La restricción a las zonas agrícolas se modeló en función del porcentaje de almacenamiento en cada acuífero del cual se extrajo agua para este fin. A diferencia de la extracción en el abastecimiento a la ciudad de Hermosillo para las restricciones agrícolas la cantidad que se disminuye o aumenta, según sea el caso, es la demanda de la zona agrícola.

Con restricciones de éste tipo se busca proponer políticas que permitan el uso eficiente y responsable del recurso hídrico subterráneo disminuyendo los abatimientos en los acuíferos.

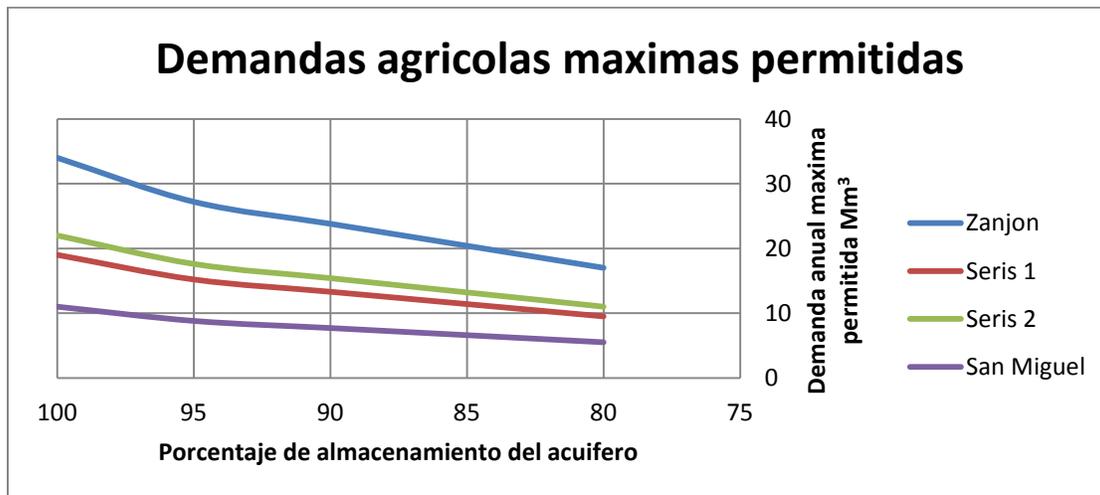


Ilustración 40. Escalones de restricción en zonas agrícolas

## 4.3.8 Resultados

### Descripción de escenarios

La modificación de las variables de decisión entrega una amplia cantidad de modelaciones que fueron reducidas a las 16 descritas en la siguiente tabla.

Tabla 16. Descripción de escenarios

Escenario	Descripción					
	Ob. Tom. m3/s	Inf. Cap. m3/s	Rec. Yesca Hm3	Rest. Agric.	Dem. Inc. % anual	Cam. Clim.
1	10	10	0	sin	no	no
2	10	10	22+	sin	no	no
3	10	10	60+	sin	no	no
4	10	10	0	con	no	no
5	10	10	22+	con	no	no
6	10	10	60+	con	no	no
7	10	10	0	sin	no	no
8	10	10	22+	sin	no	no
9	10	10	60+	sin	no	no
10	10	10	0	con	no	no
11	10	10	22+	con	no	no
12	10	10	60+	con	no	no
13	10	10	22+	con	1.7	no
14	10	10	60+	con	1.7	no
15	10	10	22+	con	1.7	si
16	10	10	60+	con	1.7	si
17	10	10	0	con	1.7	si

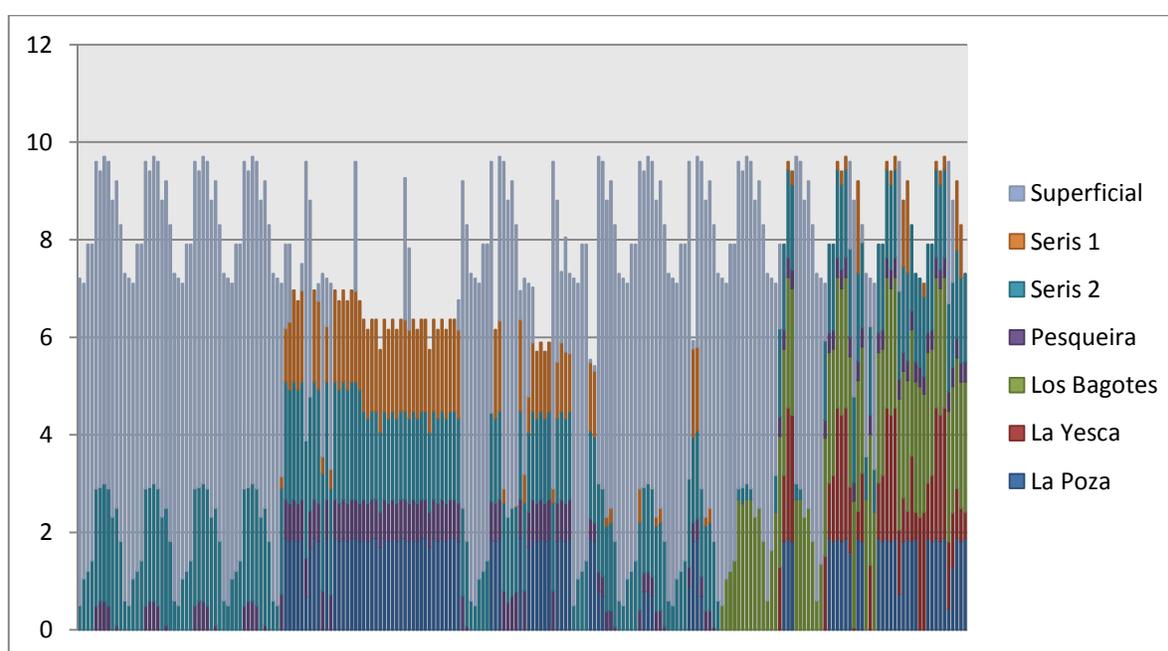
  

Ob. Tom.	Apertura de la obra de toma en la presa Molinito
Inf. Cap.	Capacidad de infiltración del río Sonora aguas debajo de Molinito
Rec. Yesca	Recarga artificial en el acuífero de la Yesca
Rest. Agric.	Restricción de la extracción de agua destinada al uso agrícola
Dem. Inc.	Incremento en la demanda de la ciudad de Hermosillo
Cam. Clim.	Cambio climático

## Comparación de resultados

Como producto final se obtuvo un modelo capaz de analizar diferentes panoramas de planeación, dentro de este apartado discutiremos resultados obtenidos en el modelo para un escenario con características similares a las actuales, denominado escenario histórico, y los compararemos con resultados para escenarios de planeación con estructuras de recarga artificial de acuíferos.

En cuanto al abastecimiento de la ciudad de Hermosillo en el escenario histórico se observó que durante un periodo de sequía la ciudad fue abastecida de recursos subterráneos principalmente, este comportamiento simula la situación actual de las ciudades sin planeación en la explotación del recurso. El porcentaje de abastecimiento de la demanda, simulada constante, es del 100%; al abastecer el total de la demanda se genera una sobreexplotación de los mantos acuíferos produciendo un abatimiento importante en los años de sequía.



**Ilustración 41. Abastecimiento modelado a la ciudad de Hermosillo a nivel mensual y de sus diferentes fuentes. Periodo (1993-2005)**

Para un escenario sin restricción agrícola y de condiciones de simulación similares a las condiciones actuales el abastecimiento a la ciudad de Hermosillo varía al ser comparado con un escenario con recarga artificial en la Yesca, se nota un incremento en la extracción de los acuíferos de la CMB y al mismo tiempo una recuperación en los niveles de acuíferos de la CMA con una disminución en el abatimiento de los acuíferos de la CMB.

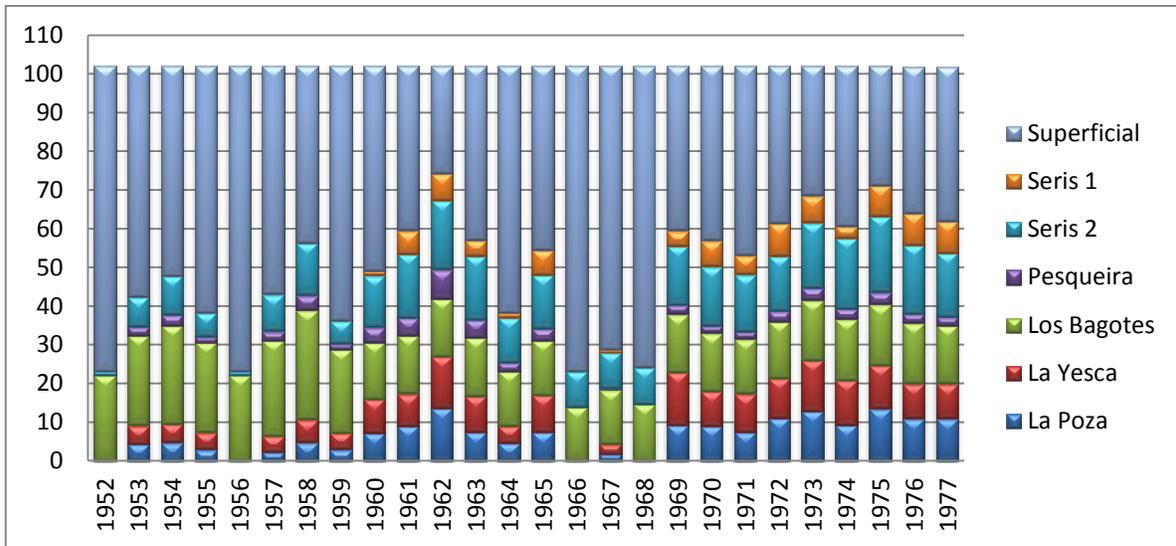


Ilustración 42. Abastecimiento a la ciudad de Hermosillo. Periodo 1952-1977. Condiciones actuales en la zona

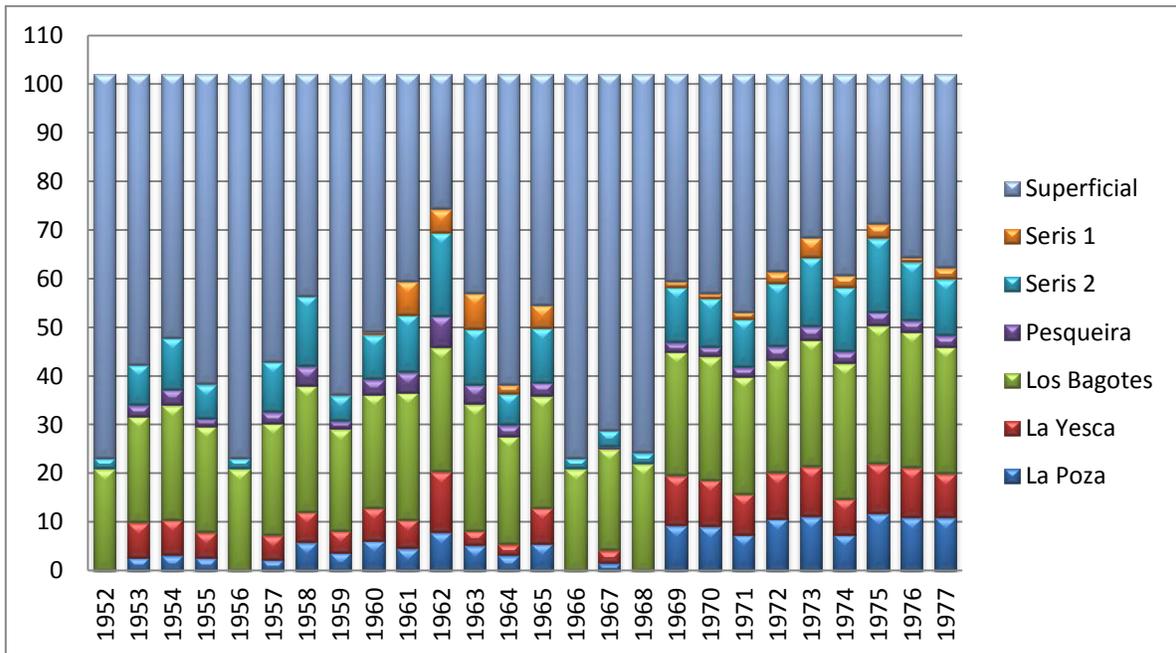


Ilustración 43. Abastecimiento a la ciudad de Hermosillo. Periodo 1952-1977. Condiciones de recarga artificial total en la Yesca

En un análisis de balances de agua en acuíferos se puede observar que para todas las modelaciones realizadas el periodo de mayor abatimiento es de 1952 a 1977; en la siguiente figura se muestra abatimiento o ganancia de agua para cada acuífero del escenario de simulación sin restricción agrícola ni recarga en el manto acuífero de la Yesca.

**Tabla 17. Diferencia de volúmenes en acuíferos para el escenario de condiciones actuales**

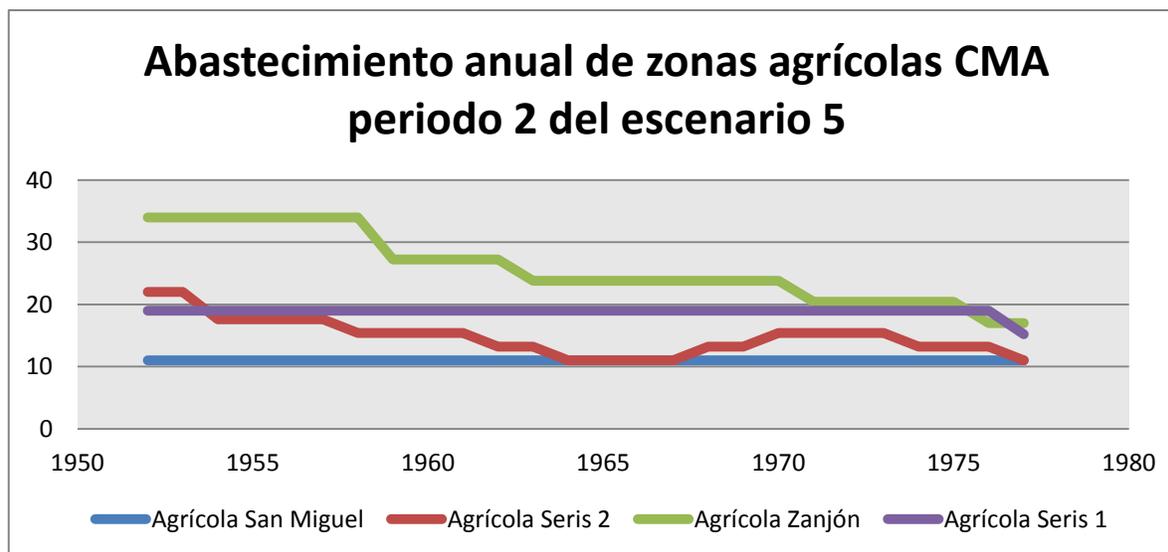
ΔV TOTAL Mm3									
Periodo		CMB			CMA				
		Bagotes	Yesca	Total	Pesqueira	Pesqueira 2	Seris 1	Seris 2	Total
1942	1967	-608	-25	-634	-458	54	54	-556	-906
1952	1977	-602	-65	-667	-524	11	-97	-482	-1092
1962	1987	-676	-100	-776	-474	62	145	-334	-601
1972	1997	-578	-9	-587	-467	90	72	-300	-605
1982	2007	-553	-15	-568	-435	137	35	-379	-642

Al comparar los resultados de este escenario con un escenario en el que se modeló una recarga artificial de agua residual en el acuífero de la Yesca, podemos observar la ganancia que se tendría en la disminución del abatimiento en un periodo de 25 años para la CMB y el impacto en la CMA. El impacto positivo que se tiene con una recarga artificial en la CMB se extiende a la CMA ya que el incremento de almacenamiento en la CMB propició la disminución de la explotación de la CMA, solo queda por resolver el problema de la explotación agrícola de los acuíferos.

**Tabla 18. Diferencia de volúmenes en acuíferos para el escenario con recarga en el acuífero de la Yesca**

ΔV TOTAL Mm3									
Periodo		CMB			CMA				
		Bagotes	Yesca	Total	Pesqueira	Pesqueira 2	Seris 1	Seris 2	Total
1942	1967	-416	239	-177	-552	32	111	-383	-792
1952	1977	-394	214	-180	-598	11	-40	-357	-985
1962	1987	-378	252	-126	-559	49	155	-200	-554
1972	1997	-365	249	-115	-563	68	100	-168	-562
1982	2007	-321	250	-72	-506	137	93	-212	-489

Se observó una disminución en la sobrexplotación de acuíferos para escenarios con recarga de más de 60 Hm<sup>3</sup> anuales en el acuífero de la Yesca y políticas de restricción de extracción de agua para uso agrícola.



**Ilustración 44. Abastecimiento de zonas agrícolas (Hm<sup>3</sup>) vs tiempo (mes de simulación)**

El gráfico muestra, para un escenario con recarga artificial de 22 Mm<sup>3</sup> y con restricción agrícola, como fue el abastecimiento de las zonas agrícolas del modelo considerando los cambios en el almacenamiento de agua subterránea. La zona agrícola Zanjón, que se encuentra en el acuífero Pesqueira, redujo su extracción y aun así el acuífero no se recuperó por lo tanto no volvió a incrementar su extracción; La zona agrícola San Miguel, abastecida del acuífero bajo de Pesqueira, se mantuvo constante en el tiempo indicativo de equilibrio en el acuífero; La zona agrícola Seris 2, que extrajo agua del acuífero bajo de Mesa del Seris ó Seris 2, redujo su extracción y después la incremento de nuevo indicativo de que el acuífero se recupero durante la simulación.

En el siguiente gráfico podemos observar cómo fue el comportamiento del almacenamiento en los acuíferos durante la simulación del escenario 5 en el periodo 2; la implementación de la política de restricción permitió una sana explotación del recurso subterráneo abasteciendo tanto el uso agrícola como el uso urbano, aun así las medidas de restricción tomadas en el acuífero de Pesqueira no fueron suficientes ya que la tendencia de éste acuífero es a incrementar su abatimiento.

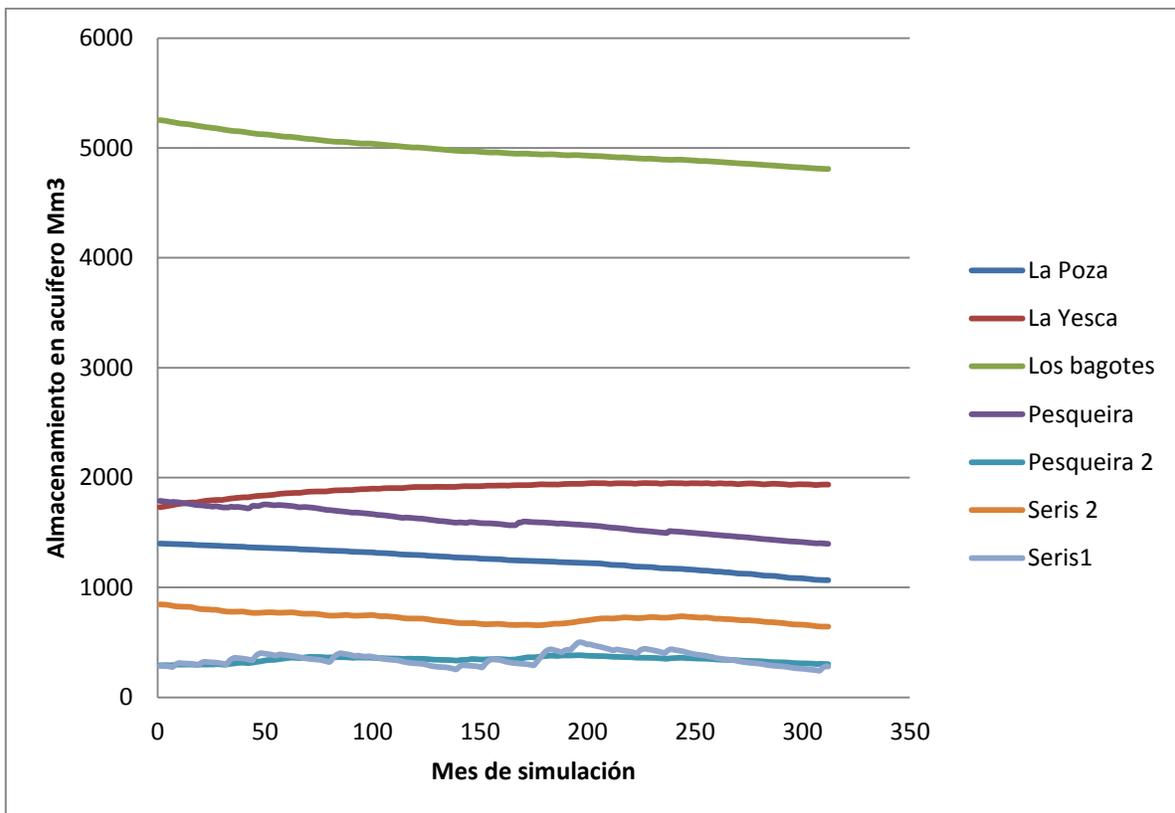


Ilustración 45. Almacenamiento en acuíferos vs tiempo. Escenario 5. Periodo 2

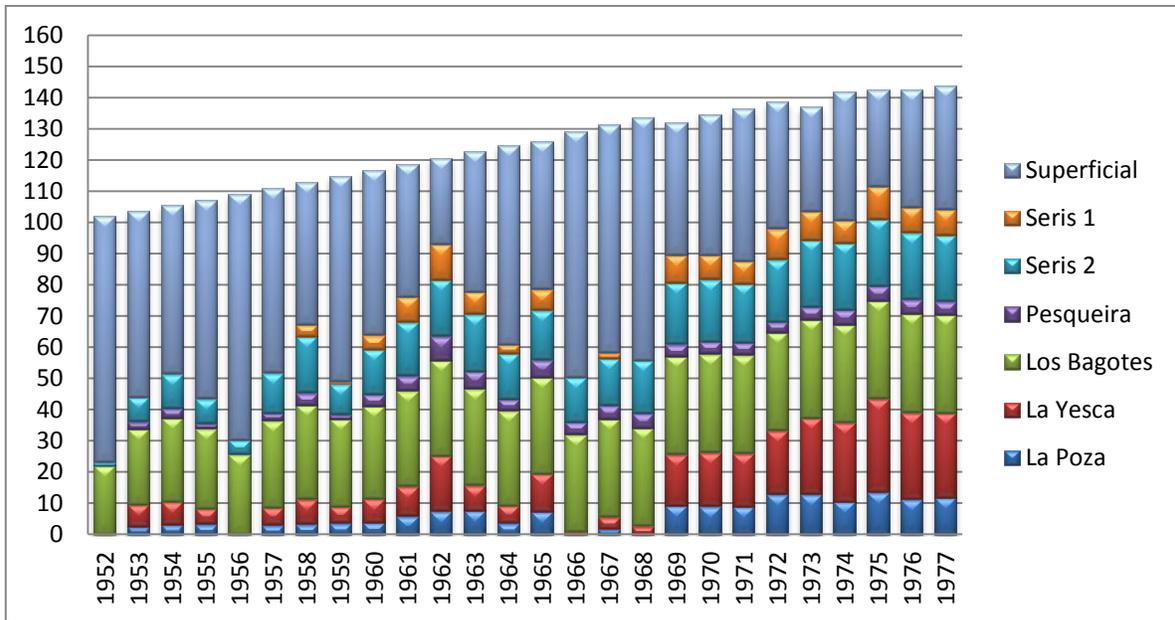


Ilustración 46. Abastecimiento a Hermosillo (Hm3 anuales) escenario 11 periodo 2

Los escenarios simulados con incremento de demanda tienden a tener un déficit en el abastecimiento a la ciudad de Hermosillo máximo de 20% de la demanda total anual; Aunque en escenarios con recarga artificial el incremento en el almacenamiento subterráneo sea notorio el déficit en el abastecimiento a Hermosillo se sigue presentando en años con sequía, lo que conduce a pensar que la capacidad de conducción de las fuentes subterráneas hacia la ciudad de Hermosillo no es suficiente para abastecer el total de su demanda.

El panorama es diferente en escenarios con cambio climático, para dichos escenarios el incremento en el déficit de agua superficial impacta directamente el abastecimiento a la ciudad de Hermosillo y la cantidad de agua no entregada aumenta, como se muestra en el siguiente gráfico.

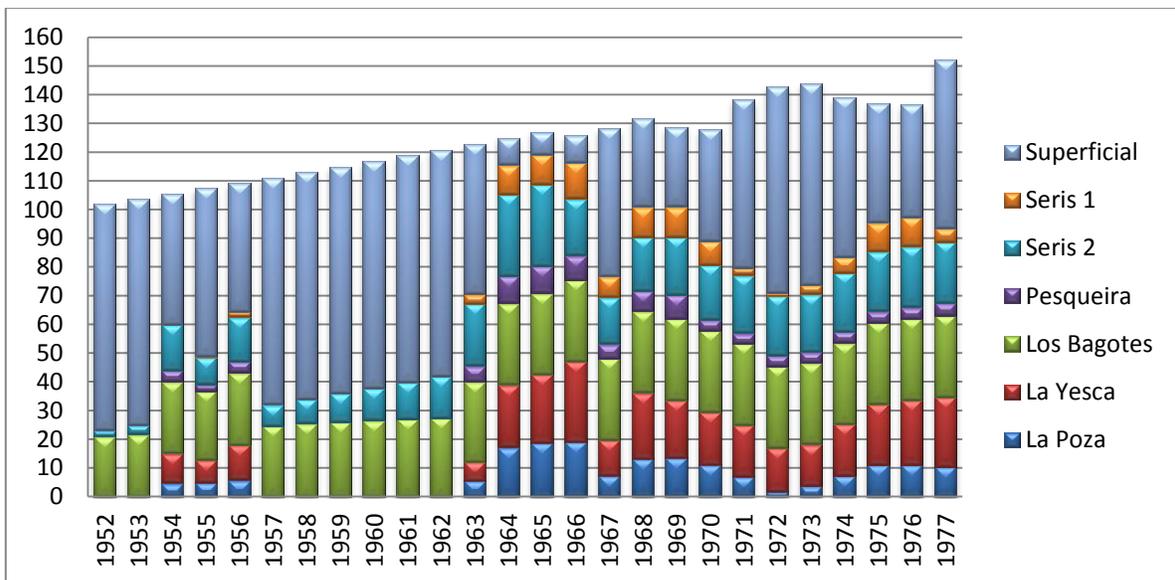


Ilustración 47. Abastecimiento a Hermosillo (Hm3 anuales) escenario 16 periodo 2

Como primeras conclusiones que se pueden obtener de éstas tablas podríamos considerar:

- La implementación de lagunas de infiltración que reducen significativamente la sobreexplotación de los acuíferos de la CMB
- La implementación de políticas de extracción para consumo agrícola así como el incremento en la eficiencia del riego
- Considerar un estudio más profundo de la combinación adecuada de la cantidad de agua que será infiltrada y la que será utilizada para riego

En las siguientes dos tablas se presenta el resumen de los diferenciales de volumen, promedio de cada periodo, y el porcentaje de suministro promedio a la ciudad de Hermosillo.

**Tabla 19. Tabla resumen de diferenciales de volumen promedio**

ESCENARIOS		Suministro sin incremento de demanda			Suministro con incremento del 1.7% anual		
		$\Delta V$ (Mm <sup>3</sup> /periodo)		SUMINISTR O %	$\Delta V$ (Mm <sup>3</sup> /periodo)		SUMINISTRO %
		CMA	CMB	Hermosillo	CMA	CMB	Hermosillo
Recarga actual	Sin restricción agrícola	-298	-646	100	-402	-727	98
Recarga 41 (lagunas)-22 (DR)		-134	-170	100	-341	-123	98
Recarga total		-121	-134	100	-336	-76	100
Recarga actual	Con restricción agrícola	-119	-660	100	-314	-643	100
Recarga 41 (lagunas)-22 (DR)		17	-162	100	-193	-88	100
Recarga total		27	-127	100	-193	-31	100

**Tabla 20. Tabla resumen de diferenciales de volumen promedio para escenarios con cambio climático**

ESCENARIOS		$\Delta V$ (Mm <sup>3</sup> /periodo)		
		CMA	CMB	TOTAL
Recarga actual	Con restricción agrícola	-637	-203	-840
Suministro 22 al DR – caudal restante PTAR (Mm <sup>3</sup> /año)		-722	-250	-972
Recarga total		-712	-210	-922

## Conclusiones y recomendaciones

---

En general la modelación matemática arroja buenos resultados, la verdadera dificultad se encuentra en el análisis y síntesis de los mismos; la modelación matemática se puede resumir en 7 pasos a seguir:

- I. Definición del problema de interés y recolección de los datos relevantes
- II. Elección previa de modelos útiles para simular el problema
- III. Comparación de datos relevantes y modelos existentes; elección de modelo a usar
- IV. Primera formulación del modelo
- V. Calibración con datos históricos existentes
- VI. Simulación de condiciones deseadas
- VII. Análisis de resultados

La delimitación de los alcances que tendrá el modelo, su objetivo y principales variables de decisión constituyen el punto de arranque de la modelación ya que estos tres puntos nos acercarán, en ciertos casos definirán, al modelo que debe ser utilizado.

Es importante considerar, dentro de la definición del objetivo y alcances, las limitaciones que tiene el sistema que se pretende modelar, si no son consideradas los resultados obtenidos de la modelación serán óptimos para un sistema que operacionalmente no existe. Estos limitantes pueden ser de carácter físico o social; es recomendable que las limitaciones físicas sean analizadas en un estudio de campo previo a la modelación del sistema; en el aspecto social el agua y su manejo es un tema de gran interés político, por lo que es recomendable considerar los puntos de vista y recomendaciones tanto de los organismos operadores como de los usuarios domésticos, agrícolas y comerciales.

Conocido y delimitado el objetivo se encontraran varios modelos de apoyo que serán útiles; uno de los principales factores que influyen en la elección de una de estas opciones es el costo del software y los requerimientos del mismo, si el proyecto en que se utilizará el modelo no cuenta con los recursos para hacer uso de un programa éste deberá ser eliminado de la lista de opciones; por último los datos de entrada que necesita el software y los datos con los que se cuenta o se pueden obtener, son el ultimo filtro para hacer la mejor elección.

La modelación matemática es un proceso iterativo, en el que el modelador plasma sus impresiones e ideales de un sistema; las soluciones propuestas por el modelador deben ser adecuadas y factibles, pensando siempre en los intereses de todos los involucrados. El modelo final debe tener un diseño claro para otro modelador que desee retomar la investigación, esto con el fin de evitar esfuerzos duplicados.

## Cuenca media del río Sonora

---

La modelación matemática asistida por computadora, orientada al análisis de políticas de operación y manejo de recursos hídricos, ha resultado una herramienta de gran utilidad; ayudó a elegir políticas de manejo adecuadas para la explotación de fuentes existentes del recurso hídrico, en la cuenca media baja del río Sonora, así como el análisis de nuevas fuentes de explotación y políticas de recarga artificial de acuíferos que permitirán, en un horizonte de planeación de 25 años, una explotación responsable del recurso natural buscando un equilibrio con el medio ambiente y sin dejar de lado las necesidades urbanas y agrícolas.

La operación de los vasos de almacenamiento superficial define el escurrimiento en una parte del cauce del río Sonora, la recomendación en este punto es Mantener una política de operación en la presa el Molinito que almacene hasta 30 Mm<sup>3</sup> en su vaso y libere el excedente por su obra de toma. Por sus características físicas la sección del río Sonora aguas abajo de la presa Molinito es un punto natural de infiltración con una capacidad de 8 m<sup>3</sup>/s; se recomienda incrementar esta capacidad a 10 m<sup>3</sup>/s y que el volumen excedente en la presa Molinito se libere a razón de 10 m<sup>3</sup>/s, así se infiltrará la mayor parte del flujo sobre el cauce del río evitando pérdidas por evaporación y aprovechando mayormente el volumen liberado del vaso.

El incremento en el volumen necesario para abastecer el consumo humano propicia la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento ó un aumento en la explotación de las actuales; en los escenarios modelados se muestra un desarrollo sustentable en aquellos que modelaron la recarga artificial del acuífero de la Yesca y la reducción de agua utilizada para la agricultura en la cuenca media baja.

Se recomienda la implementación de un programa de infiltración artificial de agua tratada en el acuífero de la Yesca que permita la recuperación de volumen útil almacenado en el acuífero; destinando 22 Mm<sup>3</sup> anuales al uso agrícola e infiltrando el resto del agua tratada en el acuífero de la Yesca es posible sostener, al menos los próximos 25 años, una demanda con una tasa de crecimiento de 1.7% anual y al mismo tiempo evitar grandes abatimientos en el acuífero. Es necesario, para abastecer una demanda con estas características, duplicar la capacidad de bombeo y conducción del acuífero de Bagotes, la nueva batería de pozos debe ser diseñada para evitar abatimientos puntuales.

El 93% del agua extraída del subsuelo es destinada al uso agrícola y en el campo los sistemas de riego tienen una eficiencia del 30%, se recomienda incrementar esta eficiencia lo que provocará una disminución en los costos de producción al reducir las horas de bombeo.

Una discusión que debe realizarse es el orden de las prioridades para abastecer las demandas de la cuenca media, se recomienda utilizar el recurso para abastecer primero el uso urbano y comercial, dejando al final el uso agrícola. Este último debe ser planeado responsablemente para mantener una alta producción en campo y permitir el mantenimiento de los almacenamientos subterráneos.

Se recomienda la implementación de políticas de operación de acuíferos mediante un plan de monitoreo de pozos y una programación de volúmenes máximos de extracción; al definir la extracción máxima en función del nivel de agua en el pozo es posible controlar los abatimientos, reducir el gasto en energía eléctrica consumida y al mismo tiempo satisfacer la demanda alcanzando un equilibrio con las fuentes. Se propone comenzar con el siguiente esquema: una reducción del 10% a la extracción máxima por cada 5% de disminución del volumen inicial en el acuífero, ver ilustración 48.

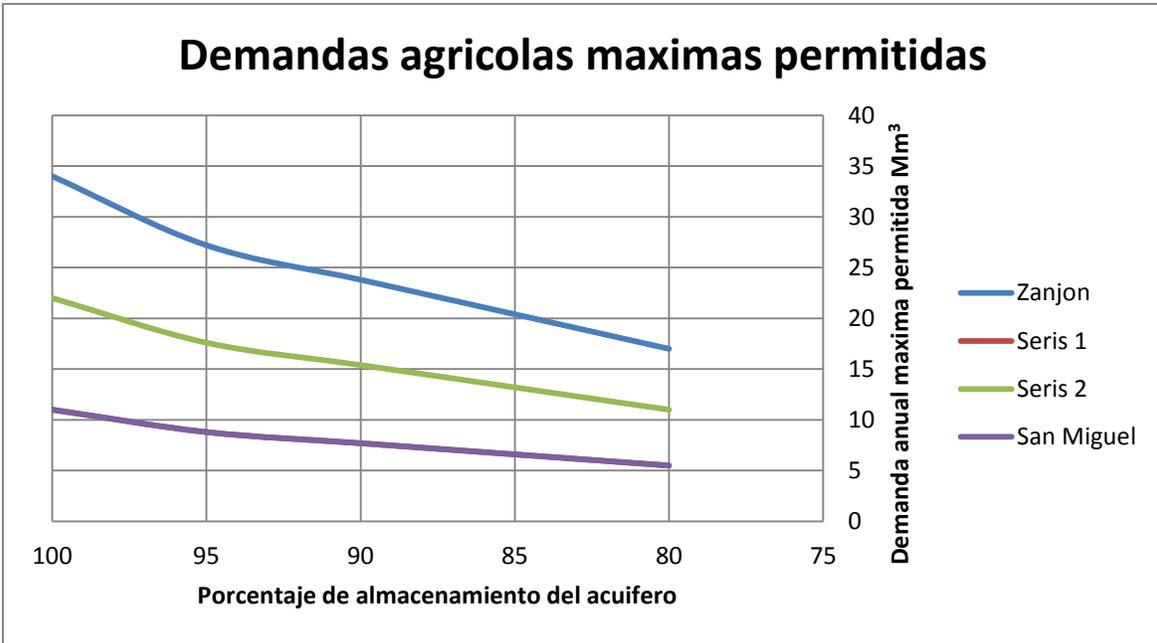


Ilustración 48. Plan de restricción de acuíferos

## 5. Bibliografía

---

- “Methods for Water Balance Computation”. No 17 de la serie "Studies and Reports in Hydrology". Instituto de Hidrología España/UNESCO. España 1981.
- “Interacción de aguas superficiales – aguas subterráneas”. Universidad Nacional de Colombia. Jaime Ignacio Vélez, Carlos Restrepo Tamayo. Medellín 2006.
- “Semblanza Histórica del Agua en México”. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México 2009.
- “Estadísticas del Agua en el Estado de Sonora 2008”. Comisión Estatal del Agua. Ingeniería y Gestión Hídrica. México 2009.
- “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Francisco Javier Aparicio Mijares. Editorial LIMUSA. Impreso en México 1992.
- “Hidrología Aplicada”. Ven Te Chow, Et. Al. Editorial McGraw-Hill. Reimpreso en Colombia, Bogotá 1994.
- “Hidraulica General”. Gilberto Sotelo Ávila. Universidad Nacional Autónoma de México. Editorial LIMUSA. México 1997.
- “Groundwater”. Freeze, R. A. y J. A. Cherry . Prentice-Hall, 1979.
- “Modelo SIMGES de simulación de la gestión de recursos hídricos”. Andreu Álvarez, J., Capilla Roma, J. y Ferrer Polo, J. Manual de usuario. Versión 2.0. UPV. Valencia.
- “Evaluación del abastecimiento de sistemas río-acuífero”. Juan Diego Martínez Nájera, Moisés Berezowsky Verduzco. Ingeniería Hidráulica en México. UNAM diciembre de 2008.

## Anexo A. Tabla de escurrimientos históricos.

Año	Río Sonora		Río Zanjón		Río San Miguel	
	Mes	Gasto m <sup>3</sup> /s	Mes	Gasto m <sup>3</sup> /s	Mes	Gasto m <sup>3</sup> /s
1941	3	0.15				
1941	4	0.14				
1941	5	0.12				
1941	6	0.08				
1941	7	4.25				
1941	8	12.95				
1941	9	7.68				
1941	10	2.82				
1941	11	0.30				
1941	12	0.41				
1942	1	0.36	1	0.00	1	0.19
1942	2	0.28	2	0.00	2	0.18
1942	3	0.23	3	0.05	3	0.16
1942	4	0.35	4	0.00	4	0.07
1942	5	0.10	5	0.00	5	0.02
1942	6	0.06	6	0.00	6	0.03
1942	7	4.70	7	0.11	7	0.53
1942	8	14.99	8	0.12	8	0.53
1942	9	1.82	9	0.05	9	0.22
1942	10	0.26	10	2.64	10	20.72
1942	11	0.21	11	0.09	11	1.09
1942	12	0.29	12	0.01	12	0.73
1943	1	0.32	1	0.06	1	0.67
1943	2	0.28	2	0.05	2	0.64
1943	3	0.19	3	0.03	3	0.57
1943	4	0.13	4	0.02	4	0.50
1943	5	0.06	5	0.00	5	0.46
1943	6	0.37	6	0.06	6	0.41
1943	7	9.20	7	0.04	7	0.65
1943	8	25.13	8	0.07	8	0.85
1943	9	13.87	9	0.08	9	0.44
1943	10	2.50	10	0.25	10	0.75
1943	11	0.26	11	0.07	11	0.45
1943	12	0.64	12	0.01	12	0.53
1944	1	0.50	1	0.02	1	0.51

1944	2	0.39	2	0.03	2	0.54
1944	3	0.34	3	0.14	3	0.53
1944	4	0.16	4	0.00	4	0.44
1944	5	0.08	5	0.00	5	0.34
1944	6	0.06	6	0.00	6	0.31
1944	7	4.68	7	0.08	7	0.34
1944	8	14.80	8	0.08	8	0.45
1944	9	2.51	9	0.09	9	0.37
1944	10	0.13	10	0.42	10	0.38
1944	11	0.14	11	0.11	11	0.32
1944	12	0.17	12	0.02	12	0.34
1945	1	0.24	1	0.00	1	2.08
1945	2	0.20	2	1.16	2	1.05
1945	3	0.17	3	0.19	3	1.03
1945	4	0.12	4	0.05	4	0.06
1945	5	0.06	5	0.05	5	0.04
1945	6	0.01	6	0.06	6	0.37
1945	7	9.79	7	0.28	7	1.42
1945	8	18.28	8	0.56	8	0.34
1945	9	0.20	9	0.20	9	0.17
1945	10	4.54	10	0.32	10	0.24
1945	11	0.19	11	0.25	11	0.08
1945	12	0.20	12	0.08	12	0.07
1946	1	0.23	1	0.01	1	0.08
1946	2	0.22	2	0.00	2	0.10
1946	3	0.20	3	0.01	3	0.07
1946	4	0.10	4	0.00	4	0.06
1946	5	0.06	5	0.00	5	0.03
1946	6	0.02	6	0.02	6	0.05
1946	7	20.47	7	0.11	7	1.20
1946	8	22.11	8	0.05	8	0.16
1946	9	14.42	9	0.09	9	0.43
1946	10	1.91	10	0.00	10	0.10
1946	11	0.21	11	0.00	11	0.10
1946	12	0.39	12	0.01	12	0.12
1947	1	0.56	1	0.01	1	0.13
1947	2	0.23	2	0.01	2	0.10
1947	3	0.22	3	0.00	3	0.09
1947	4	0.11	4	0.00	4	0.08
1947	5	0.07	5	0.00	5	0.06
1947	6	0.02	6	0.00	6	0.06

1947	7	1.14	7	0.03	7	0.23
1947	8	6.13	8	0.13	8	0.82
1947	9	1.19	9	0.21	9	0.75
1947	10	0.11	10	0.00	10	0.01
1947	11	0.13	11	0.00	11	0.01
1947	12	0.14	12	0.00	12	0.00
1948	1	0.16	1	0.00	1	0.01
1948	2	0.18	2	0.00	2	0.00
1948	3	0.15	3	0.00	3	0.00
1948	4	0.09	4	0.00	4	0.00
1948	5	0.04	5	0.00	5	0.00
1948	6	0.01	6	0.00	6	0.00
1948	7	14.06	7	0.11	7	0.88
1948	8	14.77	8	0.47	8	3.49
1948	9	2.54	9	0.01	9	0.06
1948	10	1.42	10	0.00	10	0.00
1948	11	0.18	11	0.00	11	0.00
1948	12	0.31	12	0.00	12	0.00
1949	1	6.72	1	0.00	1	0.01
1949	2	17.78	2	0.01	2	0.05
1949	3	0.47	3	0.25	3	2.16
1949	4	0.19	4	0.00	4	0.00
1949	5	0.10	5	0.00	5	0.00
1949	6	0.13	6	0.00	6	0.00
1949	7	11.65	7	0.19	7	1.11
1949	8	5.90	8	0.12	8	0.64
1949	9	2.36	9	0.03	9	0.23
1949	10	0.15	10	0.01	10	0.07
1949	11	0.11	11	0.01	11	0.04
1949	12	0.28	12	1.43	12	10.34
1950	1	0.18	1	2.44	1	15.88
1950	2	0.15	2	0.16	2	1.84
1950	3	0.13	3	0.03	3	0.29
1950	4	0.08	4	0.03	4	0.17
1950	5	0.03	5	0.02	5	0.18
1950	6	0.29	6	0.01	6	0.18
1950	7	19.65	7	0.22	7	1.03
1950	8	8.64	8	0.76	8	3.59
1950	9	1.07	9	0.30	9	0.93
1950	10	0.10	10	0.00	10	0.54
1950	11	0.11	11	0.01	11	0.61

1950	12	0.15	12	0.03	12	0.55
1951	1	0.19	1	0.06	1	0.60
1951	2	0.16	2	0.10	2	1.01
1951	3	0.21	3	0.03	3	0.50
1951	4	0.13	4	0.00	4	0.49
1951	5	0.05	5	0.00	5	0.39
1951	6	0.00	6	0.02	6	0.41
1951	7	11.28	7	0.32	7	1.58
1951	8	26.41	8	1.00	8	8.34
1951	9	3.98	9	0.09	9	0.89
1951	10	11.69	10	0.06	10	0.47
1951	11	1.42	11	0.00	11	0.42
1951	12	0.65	12	0.09	12	0.40
1952	1	0.45	1	0.11	1	0.82
1952	2	0.25	2	0.03	2	0.39
1952	3	0.24	3	0.08	3	0.42
1952	4	0.28	4	0.12	4	0.35
1952	5	0.12	5	0.02	5	0.25
1952	6	0.04	6	0.02	6	0.39
1952	7	14.36	7	1.08	7	4.86
1952	8	20.11	8	0.16	8	1.56
1952	9	0.28	9	0.37	9	1.77
1952	10	0.07	10	0.05	10	0.53
1952	11	0.10	11	0.04	11	0.32
1952	12	0.84	12	0.00	12	0.35
1953	1	0.24	1	0.04	1	0.33
1953	2	0.21	2	0.03	2	0.32
1953	3	0.45	3	0.00	3	0.28
1953	4	0.18	4	0.00	4	0.24
1953	5	0.10	5	0.00	5	0.17
1953	6	0.07	6	0.00	6	0.14
1953	7	23.93	7	0.33	7	2.15
1953	8	6.77	8	0.23	8	1.65
1953	9	0.21	9	0.19	9	1.17
1953	10	0.09	10	0.37	10	0.17
1953	11	0.09	11	0.01	11	0.09
1953	12	0.14	12	0.24	12	1.85
1954	1	0.15	1	0.05	1	0.25
1954	2	0.13	2	0.46	2	3.31
1954	3	0.12	3	0.94	3	7.66
1954	4	0.07	4	0.05	4	0.31

1954	5	0.03	5	0.00	5	0.21
1954	6	0.00	6	0.00	6	0.19
1954	7	12.58	7	0.26	7	1.53
1954	8	26.43	8	0.80	8	4.35
1954	9	11.54	9	0.28	9	2.04
1954	10	0.35	10	1.21	10	12.59
1954	11	0.18	11	0.19	11	1.28
1954	12	0.17	12	0.34	12	1.28
1955	1	0.30	1	0.78	1	4.24
1955	2	0.28	2	0.05	2	0.79
1955	3	0.22	3	0.00	3	0.54
1955	4	0.13	4	0.06	4	0.46
1955	5	0.09	5	0.08	5	0.39
1955	6	0.05	6	0.11	6	0.41
1955	7	11.77	7	1.74	7	9.28
1955	8	42.51	8	2.82	8	19.87
1955	9	1.07	9	0.85	9	3.49
1955	10	0.23	10	0.33	10	1.95
1955	11	0.18	11	0.65	11	1.62
1955	12	0.20	12	1.24	12	10.64
1956	1	0.27	1	1.77	1	7.94
1956	2	0.31	2	0.54	2	6.15
1956	3	0.19	3	0.46	3	2.09
1956	4	0.15	4	0.10	4	1.04
1956	5	0.10	5	0.00	5	0.85
1956	6	0.07	6	0.02	6	0.71
1956	7	17.77	7	0.53	7	3.55
1956	8	4.40	8	0.89	8	5.05
1956	9	0.83	9	0.30	9	2.13
1956	10	0.13	10	0.22	10	1.74
1956	11	0.14	11	0.19	11	1.66
1956	12	0.18	12	0.16	12	1.64
1957	1	0.21	1	0.14	1	0.85
1957	2	0.18	2	0.18	2	1.51
1957	3	0.17	3	0.09	3	0.72
1957	4	0.12	4	0.44	4	0.61
1957	5	0.09	5	0.22	5	0.70
1957	6	0.02	6	0.07	6	0.63
1957	7	7.72	7	0.79	7	3.64
1957	8	3.92	8	0.72	8	3.84
1957	9	2.49	9	0.48	9	2.37

1957	10	0.67	10	0.16	10	1.35
1957	11	0.65	11	0.13	11	1.20
1957	12	0.20	12	0.23	12	1.51
1958	1	0.23	1	0.07	1	1.13
1958	2	0.26	2	0.11	2	0.77
1958	3	0.25	3	0.09	3	0.81
1958	4	0.16	4	0.04	4	0.47
1958	5	0.10	5	0.04	5	0.46
1958	6	0.22	6	0.12	6	0.43
1958	7	4.12	7	0.18	7	1.14
1958	8	33.82	8	0.31	8	2.36
1958	9	23.36	9	0.07	9	0.58
1958	10	4.74	10	0.15	10	0.50
1958	11	0.96	11	0.01	11	0.56
1958	12	0.59	12	0.10	12	0.67
1959	1	0.69	1	0.12	1	0.62
1959	2	0.44	2	0.03	2	0.56
1959	3	0.24	3	0.08	3	0.54
1959	4	0.18	4	0.05	4	0.59
1959	5	0.11	5	0.00	5	0.35
1959	6	0.00	6	0.00	6	0.26
1959	7	5.13	7	0.23	7	2.22
1959	8	13.06	8	0.41	8	3.10
1959	9	1.58	9	0.35	9	1.37
1959	10	0.13	10	0.10	10	1.11
1959	11	0.16	11	0.03	11	0.41
1959	12	0.19	12	0.15	12	0.41
1960	1	14.12	1	0.11	1	0.50
1960	2	1.59	2	0.06	2	0.41
1960	3	0.31	3	0.02	3	0.31
1960	4	0.08	4	0.00	4	0.28
1960	5	0.04	5	0.00	5	0.26
1960	6	0.04	6	0.11	6	0.25
1960	7	1.16	7	0.10	7	1.57
1960	8	6.62	8	0.26	8	2.09
1960	9	3.44	9	0.12	9	0.72
1960	10	0.16	10	0.09	10	0.63
1960	11	0.17	11	0.01	11	0.24
1960	12	0.30	12	0.03	12	0.26
1961	1	1.42	1	0.05	1	0.28
1961	2	0.41	2	0.02	2	0.27

1961	3	0.27	3	0.01	3	0.23
1961	4	0.12	4	0.03	4	0.21
1961	5	0.08	5	0.10	5	0.16
1961	6	0.76	6	0.01	6	0.15
1961	7	3.83	7	0.79	7	4.64
1961	8	9.19	8	0.42	8	2.18
1961	9	3.27	9	0.25	9	1.41
1961	10	0.14	10	0.05	10	1.25
1961	11	0.22	11	0.04	11	0.52
1961	12	0.28	12	0.10	12	0.91
1962	1	2.24	1	0.09	1	1.10
1962	2	0.59	2	0.21	2	1.64
1962	3	0.24	3	0.23	3	3.46
1962	4	0.14	4	0.05	4	0.57
1962	5	0.08	5	0.02	5	0.54
1962	6	0.05	6	0.04	6	0.46
1962	7	1.21	7	0.23	7	1.01
1962	8	1.15	8	0.18	8	1.26
1962	9	0.91	9	0.32	9	0.99
1962	10	0.63	10	0.12	10	0.74
1962	11	0.15	11	0.15	11	0.93
1962	12	0.54	12	0.21	12	1.53
1963	1	0.16	1	0.19	1	1.55
1963	2	0.18	2	0.13	2	1.12
1963	3	0.18	3	0.11	3	0.92
1963	4	0.14	4	0.06	4	0.76
1963	5	0.09	5	0.01	5	0.54
1963	6	0.07	6	0.17	6	0.45
1963	7	16.56	7	0.23	7	1.55
1963	8	18.13	8	0.70	8	5.02
1963	9	3.40	9	0.18	9	2.06
1963	10	0.28	10	0.05	10	0.94
1963	11	0.22	11	0.00	11	0.93
1963	12	0.18	12	0.29	12	1.39
1964	1	0.20	1	0.76	1	11.01
1964	2	0.21	2	0.20	2	2.40
1964	3	0.20	3	0.03	3	1.20
1964	4	0.13	4	0.59	4	0.96
1964	5	0.10	5	0.51	5	0.71
1964	6	0.09	6	0.11	6	0.55
1964	7	13.01	7	0.18	7	1.06

1964	8	33.52	8	0.27	8	0.91
1964	9	9.70	9	0.36	9	1.21
1964	10	0.24	10	0.46	10	1.12
1964	11	0.21	11	0.22	11	1.32
1964	12	0.22	12	0.13	12	1.10
1965	1	0.24	1	0.01	1	0.89
1965	2	0.24	2	0.02	2	0.98
1965	3	0.19	3	0.04	3	0.84
1965	4	0.14	4	0.00	4	0.62
1965	5	0.10	5	0.00	5	0.49
1965	6	0.06	6	0.01	6	0.39
1965	7	1.02	7	0.08	7	0.54
1965	8	4.53	8	0.15	8	1.14
1965	9	3.10	9	0.48	9	3.56
1965	10	0.19	10	0.15	10	1.12
1965	11	0.15	11	1.53	11	10.59
1965	12	3.73	12	3.19	12	20.10
1966	1	0.55	1	0.28	1	3.07
1966	2	0.19	2	0.99	2	15.74
1966	3	0.18	3	0.06	3	4.55
1966	4	0.13	4	0.00	4	1.80
1966	5	0.06	5	0.00	5	0.91
1966	6	0.06	6	0.00	6	0.72
1966	7	24.39	7	0.11	7	0.77
1966	8	65.74	8	0.20	8	1.48
1966	9	6.66	9	0.12	9	1.73
1966	10	2.19	10	0.12	10	1.03
1966	11	0.71	11	0.65	11	1.47
1966	12	0.47	12	0.01	12	1.12
1967	1	0.95	1	0.00	1	1.12
1967	2	0.34	2	0.14	2	1.03
1967	3	0.20	3	0.00	3	0.86
1967	4	0.12	4	0.00	4	0.66
1967	5	0.06	5	0.00	5	0.50
1967	6	0.22	6	0.04	6	0.41
1967	7	11.33	7	0.45	7	3.70
1967	8	18.15	8	0.44	8	1.71
1967	9	1.73	9	0.10	9	1.27
1967	10	2.75	10	0.04	10	0.76
1967	11	0.81	11	0.03	11	0.66
1967	12	30.60	12	0.03	12	0.67

1968	1	7.49	1	0.09	1	0.67
1968	2	5.57	2	0.21	2	0.64
1968	3	16.88	3	0.04	3	0.60
1968	4	2.18	4	0.62	4	0.47
1968	5	0.18	5	0.17	5	0.32
1968	6	0.08	6	0.00	6	0.28
1968	7	5.75	7	0.12	7	0.45
1968	8	5.05	8	0.51	8	0.69
1968	9	2.16	9	0.20	9	0.81
1968	10	0.16	10	0.03	10	0.38
1968	11	0.13	11	0.39	11	0.41
1968	12	0.20	12	0.73	12	0.43
1969	1	1.22	1	0.00	1	0.38
1969	2	1.31	2	1.17	2	0.48
1969	3	0.26	3	0.20	3	0.29
1969	4	0.12	4	0.01	4	0.20
1969	5	0.05	5	0.00	5	0.23
1969	6	0.02	6	0.02	6	0.17
1969	7	2.92	7	0.34	7	1.43
1969	8	21.47	8	0.44	8	0.67
1969	9	2.29	9	0.15	9	0.40
1969	10	0.15	10	0.04	10	0.25
1969	11	0.13	11	0.14	11	0.23
1969	12	0.22	12	0.03	12	0.24
1970	1	0.27	1	0.17	1	0.26
1970	2	0.18	2	0.01	2	0.21
1970	3	0.15	3	0.02	3	0.19
1970	4	0.10	4	0.00	4	0.16
1970	5	0.06	5	0.00	5	0.09
1970	6	0.03	6	0.00	6	0.03
1970	7	18.82	7	0.06	7	0.66
1970	8	25.94	8	0.18	8	0.78
1970	9	4.37	9	0.05	9	0.43
1970	10	0.20	10	0.06	10	0.34
1970	11	0.21	11	0.01	11	0.25
1970	12	0.21	12	0.03	12	0.20
1971	1	0.24	1	0.00	1	0.19
1971	2	0.27	2	0.00	2	0.18
1971	3	0.21	3	0.05	3	0.16
1971	4	0.10	4	0.00	4	0.07
1971	5	0.06	5	0.00	5	0.02

1971	6	0.05	6	0.00	6	0.03
1971	7	12.92	7	0.11	7	0.53
1971	8	28.40	8	0.12	8	0.53
1971	9	3.84	9	0.05	9	0.22
1971	10	0.30	10	2.64	10	20.72
1971	11	0.31	11	0.09	11	1.09
1971	12	0.33	12	0.01	12	0.73
1972	1	0.34	1	0.06	1	0.67
1972	2	0.16	2	0.05	2	0.64
1972	3	0.10	3	0.03	3	0.57
1972	4	0.07	4	0.02	4	0.50
1972	5	0.04	5	0.00	5	0.46
1972	6	0.05	6	0.06	6	0.41
1972	7	1.54	7	0.04	7	0.65
1972	8	2.64	8	0.07	8	0.85
1972	9	0.50	9	0.08	9	0.44
1972	10	0.46	10	0.25	10	0.75
1972	11	0.15	11	0.07	11	0.45
1972	12	0.17	12	0.01	12	0.53
1973	1	0.22	1	0.02	1	0.51
1973	2	6.03	2	0.03	2	0.54
1973	3	0.75	3	0.14	3	0.53
1973	4	0.11	4	0.00	4	0.44
1973	5	0.04	5	0.00	5	0.34
1973	6	0.03	6	0.00	6	0.31
1973	7	1.17	7	0.08	7	0.34
1973	8	9.12	8	0.08	8	0.45
1973	9	0.16	9	0.09	9	0.37
1973	10	0.10	10	0.42	10	0.38
1973	11	0.07	11	0.11	11	0.32
1973	12	0.07	12	0.02	12	0.34
1974	1	0.12	1	0.00	1	2.08
1974	2	0.08	2	1.16	2	1.05
1974	3	0.06	3	0.19	3	1.03
1974	4	0.03	4	0.05	4	0.06
1974	5	0.01	5	0.05	5	0.04
1974	6	0.02	6	0.06	6	0.37
1974	7	9.82	7	0.28	7	1.42
1974	8	5.78	8	0.56	8	0.34
1974	9	0.42	9	0.20	9	0.17
1974	10	0.73	10	0.32	10	0.24

1974	11	1.16	11	0.25	11	0.08
1974	12	0.09	12	0.08	12	0.07
1975	1	0.08	1	0.01	1	0.08
1975	2	0.10	2	0.00	2	0.10
1975	3	0.07	3	0.01	3	0.07
1975	4	0.04	4	0.00	4	0.06
1975	5	0.00	5	0.00	5	0.03
1975	6	0.00	6	0.02	6	0.05
1975	7	10.00	7	0.11	7	1.20
1975	8	3.68	8	0.05	8	0.16
1975	9	4.08	9	0.09	9	0.43
1975	10	0.15	10	0.00	10	0.10
1975	11	0.11	11	0.00	11	0.10
1975	12	0.07	12	0.01	12	0.12
1976	1	0.11	1	0.01	1	0.13
1976	2	0.10	2	0.01	2	0.10
1976	3	0.04	3	0.00	3	0.09
1976	4	0.01	4	0.00	4	0.08
1976	5	0.00	5	0.00	5	0.06
1976	6	2.65	6	0.00	6	0.06
1976	7	9.21	7	0.03	7	0.23
1976	8	4.03	8	0.13	8	0.82
1976	9	6.47	9	0.21	9	0.75
1976	10	0.17	10	0.00	10	0.01
1976	11	0.12	11	0.00	11	0.01
1976	12	0.09	12	0.00	12	0.00
1977	1	0.13	1	0.00	1	0.01
1977	2	0.07	2	0.00	2	0.00
1977	3	0.04	3	0.00	3	0.00
1977	4	0.03	4	0.00	4	0.00
1977	5	0.00	5	0.00	5	0.00
1977	6	0.00	6	0.00	6	0.00
1977	7	12.19	7	0.11	7	0.88
1977	8	29.87	8	0.47	8	3.49
1977	9	1.92	9	0.01	9	0.06
1977	10	1.55	10	0.00	10	0.00
1977	11	0.33	11	0.00	11	0.00
1977	12	0.09	12	0.00	12	0.00
1978	1	0.13	1	0.00	1	0.01
1978	2	0.10	2	0.01	2	0.05
1978	3	7.23	3	0.25	3	2.16

1978	4	0.18	4	0.00	4	0.00
1978	5	0.09	5	0.00	5	0.00
1978	6	0.01	6	0.00	6	0.00
1978	7	2.36	7	0.19	7	1.11
1978	8	5.03	8	0.12	8	0.64
1978	9	1.45	9	0.03	9	0.23
1978	10	0.16	10	0.01	10	0.07
1978	11	0.27	11	0.01	11	0.04
1978	12	25.18	12	1.43	12	10.34
1979	1	57.39	1	2.44	1	15.88
1979	2	12.99	2	0.16	2	1.84
1979	3	2.36	3	0.03	3	0.29
1979	4	0.29	4	0.03	4	0.17
1979	5	0.07	5	0.02	5	0.18
1979	6	0.00	6	0.01	6	0.18
1979	7	2.29	7	0.22	7	1.03
1979	8	17.69	8	0.76	8	3.59
1979	9	1.30	9	0.30	9	0.93
1979	10	0.22	10	0.00	10	0.54
1979	11	0.10	11	0.01	11	0.61
1979	12	0.05	12	0.03	12	0.55
1980	1	0.09	1	0.06	1	0.60
1980	2	0.78	2	0.10	2	1.01
1980	3	0.03	3	0.03	3	0.50
1980	4	0.00	4	0.00	4	0.49
1980	5	0.00	5	0.00	5	0.39
1980	6	0.00	6	0.02	6	0.41
1980	7	6.61	7	0.32	7	1.58
1980	8	20.75	8	1.00	8	8.34
1980	9	1.94	9	0.09	9	0.89
1980	10	0.15	10	0.06	10	0.47
1980	11	0.14	11	0.00	11	0.42
1980	12	0.13	12	0.09	12	0.40
1981	1	1.50	1	0.11	1	0.82
1981	2	0.11	2	0.03	2	0.39
1981	3	0.09	3	0.08	3	0.42
1981	4	0.01	4	0.12	4	0.35
1981	5	0.03	5	0.02	5	0.25
1981	6	0.68	6	0.02	6	0.39
1981	7	10.42	7	1.08	7	4.86
1981	8	3.65	8	0.16	8	1.56

1981	9	3.34	9	0.37	9	1.77
1981	10	0.70	10	0.05	10	0.53
1981	11	0.13	11	0.04	11	0.32
1981	12	0.11	12	0.00	12	0.35
1982	1	0.13	1	0.04	1	0.33
1982	2	0.09	2	0.03	2	0.32
1982	3	0.05	3	0.00	3	0.28
1982	4	0.01	4	0.00	4	0.24
1982	5	0.00	5	0.00	5	0.17
1982	6	0.00	6	0.00	6	0.14
1982	7	2.20	7	0.33	7	2.15
1982	8	1.54	8	0.23	8	1.65
1982	9	5.07	9	0.19	9	1.17
1982	10	0.12	10	0.37	10	0.17
1982	11	0.13	11	0.01	11	0.09
1982	12	3.69	12	0.24	12	1.85
1983	1	0.60	1	0.05	1	0.25
1983	2	10.80	2	0.46	2	3.31
1983	3	23.06	3	0.94	3	7.66
1983	4	0.57	4	0.05	4	0.31
1983	5	0.13	5	0.00	5	0.21
1983	6	0.13	6	0.00	6	0.19
1983	7	10.13	7	0.26	7	1.53
1983	8	15.10	8	0.80	8	4.35
1983	9	18.21	9	0.28	9	2.04
1983	10	39.02	10	1.21	10	12.59
1983	11	3.97	11	0.19	11	1.28
1983	12	3.88	12	0.34	12	1.28
1984	1	6.81	1	0.78	1	4.24
1984	2	1.10	2	0.05	2	0.79
1984	3	0.25	3	0.00	3	0.54
1984	4	0.12	4	0.06	4	0.46
1984	5	0.10	5	0.08	5	0.39
1984	6	0.07	6	0.11	6	0.41
1984	7	22.68	7	1.74	7	9.28
1984	8	60.91	8	2.82	8	19.87
1984	9	8.30	9	0.85	9	3.49
1984	10	2.20	10	0.33	10	1.95
1984	11	1.35	11	0.65	11	1.62
1984	12	25.79	12	1.24	12	10.64
1985	1	18.68	1	1.77	1	7.94

1985	2	12.30	2	0.54	2	6.15
1985	3	3.74	3	0.46	3	2.09
1985	4	0.78	4	0.10	4	1.04
1985	5	0.82	5	0.00	5	0.85
1985	6	0.07	6	0.02	6	0.71
1985	7	6.93	7	0.53	7	3.55
1985	8	19.00	8	0.89	8	5.05
1985	9	8.00	9	0.30	9	2.13
1985	10	7.96	10	0.22	10	1.74
1985	11	1.47	11	0.19	11	1.66
1985	12	2.07	12	0.16	12	1.64
1986	1	0.56	1	0.14	1	0.85
1986	2	2.40	2	0.18	2	1.51
1986	3	0.12	3	0.09	3	0.72
1986	4	0.06	4	0.44	4	0.61
1986	5	0.20	5	0.22	5	0.70
1986	6	0.04	6	0.07	6	0.63
1986	7	32.04	7	0.79	7	3.64
1986	8	30.10	8	0.72	8	3.84
1986	9	11.11	9	0.48	9	2.37
1986	10	1.96	10	0.16	10	1.35
1986	11	1.25	11	0.13	11	1.20
1986	12	5.57	12	0.23	12	1.51
1987	1	2.12	1	0.07	1	1.13
1987	2	0.67	2	0.11	2	0.77
1987	3	0.83	3	0.09	3	0.81
1987	4	0.06	4	0.04	4	0.47
1987	5	0.05	5	0.04	5	0.46
1987	6	0.03	6	0.12	6	0.43
1987	7	3.54	7	0.18	7	1.14
1987	8	9.00	8	0.31	8	2.36
1987	9	0.23	9	0.07	9	0.58
1987	10	0.13	10	0.15	10	0.50
1987	11	0.13	11	0.01	11	0.56
1987	12	0.14	12	0.10	12	0.67
1988	1	0.15	1	0.12	1	0.62
1988	2	0.15	2	0.03	2	0.56
1988	3	0.10	3	0.08	3	0.54
1988	4	0.04	4	0.05	4	0.59
1988	5	0.02	5	0.00	5	0.35
1988	6	0.00	6	0.00	6	0.26

1988	7	12.67	7	0.23	7	2.22
1988	8	10.51	8	0.41	8	3.10
1988	9	13.56	9	0.35	9	1.37
1988	10	1.03	10	0.10	10	1.11
1988	11	0.22	11	0.03	11	0.41
1988	12	0.87	12	0.15	12	0.41
1989	1	0.86	1	0.11	1	0.50
1989	2	0.41	2	0.06	2	0.41
1989	3	0.15	3	0.02	3	0.31
1989	4	0.08	4	0.00	4	0.28
1989	5	0.06	5	0.00	5	0.26
1989	6	0.03	6	0.11	6	0.25
1989	7	12.43	7	0.10	7	1.57
1989	8	15.26	8	0.26	8	2.09
1989	9	2.99	9	0.12	9	0.72
1989	10	0.25	10	0.09	10	0.63
1989	11	0.16	11	0.01	11	0.24
1989	12	0.16	12	0.03	12	0.26
1990	1	0.16	1	0.05	1	0.28
1990	2	0.17	2	0.02	2	0.27
1990	3	0.12	3	0.01	3	0.23
1990	4	0.09	4	0.03	4	0.21
1990	5	0.04	5	0.10	5	0.16
1990	6	0.02	6	0.01	6	0.15
1990	7	16.67	7	0.79	7	4.64
1990	8	39.74	8	0.42	8	2.18
1990	9	12.21	9	0.25	9	1.41
1990	10	7.73	10	0.05	10	1.25
1990	11	0.73	11	0.04	11	0.52
1990	12	1.85	12	0.10	12	0.91
1991	1	0.31	1	0.09	1	1.10
1991	2	0.46	2	0.21	2	1.64
1991	3	0.97	3	0.23	3	3.46
1991	4	0.05	4	0.05	4	0.57
1991	5	0.05	5	0.02	5	0.54
1991	6	0.15	6	0.04	6	0.46
1991	7	0.32	7	0.23	7	1.01
1991	8	0.44	8	0.18	8	1.26
1991	9	0.35	9	0.32	9	0.99
1991	10	0.12	10	0.12	10	0.74
1991	11	0.12	11	0.15	11	0.93

1991	12	0.43	12	0.21	12	1.53
1992	1	0.44	1	0.19	1	1.55
1992	2	0.31	2	0.13	2	1.12
1992	3	0.26	3	0.11	3	0.92
1992	4	0.07	4	0.06	4	0.76
1992	5	0.05	5	0.01	5	0.54
1992	6	0.14	6	0.17	6	0.45
1992	7	0.50	7	0.23	7	1.55
1992	8	1.76	8	0.70	8	5.02
1992	9	0.72	9	0.18	9	2.06
1992	10	0.15	10	0.05	10	0.94
1992	11	0.12	11	0.00	11	0.93
1992	12	0.39	12	0.29	12	1.39
1993	1	1.93	1	0.76	1	11.01
1993	2	1.27	2	0.20	2	2.40
1993	3	2.04	3	0.03	3	1.20
1993	4	2.72	4	0.59	4	0.96
1993	5	4.02	5	0.51	5	0.71
1993	6	5.04	6	0.11	6	0.55
1993	7	10.54	7	0.18	7	1.06
1993	8	20.90	8	0.27	8	0.91
1993	9	4.90	9	0.36	9	1.21
1993	10	2.75	10	0.46	10	1.12
1993	11	2.71	11	0.22	11	1.32
1993	12	2.03	12	0.13	12	1.10
1994	1	1.88	1	0.01	1	0.89
1994	2	1.27	2	0.02	2	0.98
1994	3	2.00	3	0.04	3	0.84
1994	4	2.50	4	0.00	4	0.62
1994	5	3.98	5	0.00	5	0.49
1994	6	5.35	6	0.01	6	0.39
1994	7	15.04	7	0.08	7	0.54
1994	8	31.05	8	0.15	8	1.14
1994	9	16.94	9	0.48	9	3.56
1994	10	4.99	10	0.15	10	1.12
1994	11	2.76	11	1.53	11	10.59
1994	12	94.45	12	3.19	12	20.10
1995	1	21.39	1	0.28	1	3.07
1995	2	40.80	2	0.99	2	15.74
1995	3	9.46	3	0.06	3	4.55
1995	4	3.71	4	0.00	4	1.80

1995	5	1.04	5	0.00	5	0.91
1995	6	0.23	6	0.00	6	0.72
1995	7	0.81	7	0.11	7	0.77
1995	8	2.52	8	0.20	8	1.48
1995	9	2.01	9	0.12	9	1.73
1995	10	0.24	10	0.12	10	1.03
1995	11	0.65	11	0.65	11	1.47
1995	12	0.50	12	0.01	12	1.12
1996	1	0.51	1	0.00	1	1.12
1996	2	0.61	2	0.14	2	1.03
1996	3	0.29	3	0.00	3	0.86
1996	4	0.09	4	0.00	4	0.66
1996	5	0.01	5	0.00	5	0.50
1996	6	0.00	6	0.04	6	0.41
1996	7	11.57	7	0.45	7	3.70
1996	8	5.57	8	0.44	8	1.71
1996	9	5.58	9	0.10	9	1.27
1996	10	0.49	10	0.04	10	0.76
1996	11	0.51	11	0.03	11	0.66
1996	12	0.57	12	0.03	12	0.67
1997	1	0.55	1	0.09	1	0.67
1997	2	0.37	2	0.21	2	0.64
1997	3	0.21	3	0.04	3	0.60
1997	4	0.08	4	0.62	4	0.47
1997	5	0.05	5	0.17	5	0.32
1997	6	0.00	6	0.00	6	0.28
1997	7	1.11	7	0.12	7	0.45
1997	8	1.65	8	0.51	8	0.69
1997	9	1.50	9	0.20	9	0.81
1997	10	0.21	10	0.03	10	0.38
1997	11	0.26	11	0.39	11	0.41
1997	12	1.12	12	0.73	12	0.43
1998	1	2.13	1	0.00	1	0.38
1998	2	1.22	2	1.17	2	0.48
1998	3	2.04	3	0.20	3	0.29
1998	4	2.48	4	0.01	4	0.20
1998	5	3.99	5	0.00	5	0.23
1998	6	5.00	6	0.02	6	0.17
1998	7	6.98	7	0.34	7	1.43
1998	8	12.05	8	0.44	8	0.67
1998	9	4.27	9	0.15	9	0.40

1998	10	2.60	10	0.04	10	0.25
1998	11	2.63	11	0.14	11	0.23
1998	12	1.88	12	0.03	12	0.24
1999	1	0.24	1	0.17	1	0.26
1999	2	0.18	2	0.01	2	0.21
1999	3	0.12	3	0.02	3	0.19
1999	4	0.06	4	0.00	4	0.16
1999	5	0.00	5	0.00	5	0.09
1999	6	0.00	6	0.00	6	0.03
1999	7	2.50	7	0.06	7	0.66
1999	8	2.66	8	0.18	8	0.78
1999	9	1.11	9	0.05	9	0.43
1999	10	0.26	10	0.06	10	0.34
1999	11	0.14	11	0.01	11	0.25
1999	12	0.19	12	0.03	12	0.20
2000	1	0.21	1	0.00	1	0.19
2000	2	0.18	2	0.00	2	0.18
2000	3	0.17	3	0.05	3	0.16
2000	4	0.04	4	0.00	4	0.07
2000	5	0.00	5	0.00	5	0.02
2000	6	0.00	6	0.00	6	0.03
2000	7	1.91	7	0.11	7	0.53
2000	8	2.00	8	0.12	8	0.53
2000	9	1.40	9	0.05	9	0.22
2000	10	21.80	10	2.64	10	20.72
2000	11	4.75	11	0.09	11	1.09
2000	12	1.28	12	0.01	12	0.73
2001	1	0.83	1	0.06	1	0.67
2001	2	0.87	2	0.05	2	0.64
2001	3	0.48	3	0.03	3	0.57
2001	4	0.17	4	0.02	4	0.50
2001	5	0.02	5	0.00	5	0.46
2001	6	0.00	6	0.06	6	0.41
2001	7	1.18	7	0.04	7	0.65
2001	8	5.09	8	0.07	8	0.85
2001	9	0.86	9	0.08	9	0.44
2001	10	3.34	10	0.25	10	0.75
2001	11	0.37	11	0.07	11	0.45
2001	12	0.41	12	0.01	12	0.53
2002	1	0.43	1	0.02	1	0.51
2002	2	0.55	2	0.03	2	0.54

2002	3	0.27	3	0.14	3	0.53
2002	4	0.10	4	0.00	4	0.44
2002	5	0.01	5	0.00	5	0.34
2002	6	0.00	6	0.00	6	0.31
2002	7	0.00	7	0.08	7	0.34
2002	8	1.22	8	0.08	8	0.45
2002	9	0.33	9	0.09	9	0.37
2002	10	0.16	10	0.42	10	0.38
2002	11	0.62	11	0.11	11	0.32
2002	12	0.28	12	0.02	12	0.34
2003	1	0.30	1	0.19	1	0.21
2003	2	0.32	2	0.07	2	0.13
2003	3	0.22	3	0.11	3	0.14
2003	4	0.07	4	0.04	4	0.16
2003	5	0.00	5	0.03	5	0.09
2003	6	0.00	6	0.01	6	0.02
2003	7	3.64	7	1.66	7	1.72
2003	8	5.17	8	1.81	8	1.90
2003	9	0.96	9	0.38	9	0.57
2003	10	0.38	10	0.30	10	0.35
2003	11	0.21	11	0.13	11	0.14
2003	12	0.14	12	0.04	12	0.05
2004	1	0.20	1	0.06	1	0.07
2004	2	0.29	2	0.03	2	0.06
2004	3	0.28	3	0.07	3	0.09
2004	4	0.22	4	0.00	4	0.01
2004	5	0.00	5	0.00	5	0.01
2004	6	0.00	6	0.01	6	0.02
2004	7	5.22	7	2.21	7	2.28
2004	8	1.83	8	0.95	8	0.99
2004	9	1.02	9	0.32	9	0.48
2004	10	0.20	10	0.20	10	0.23
2004	11	0.10	11	0.01	11	0.01
2004	12	0.13	12	0.01	12	0.01
2005	1	0.17	1	0.11	1	0.12
2005	2	2.54	2	0.11	2	0.20
2005	3	0.24	3	0.04	3	0.05
2005	4	0.08	4	0.00	4	0.01
2005	5	0.01	5	0.00	5	0.01
2005	6	0.00	6	0.00	6	0.01
2005	7	0.44	7	0.73	7	0.75

2005	8	2.71	8	1.46	8	1.53
2005	9	0.36	9	0.16	9	0.24
2005	10	0.07	10	0.14	10	0.17
2005	11	0.04	11	0.10	11	0.10
2005	12	0.08	12	0.01	12	0.01
2006	1	0.11				
2006	2	0.12				
2006	3	0.10				
2006	4	0.03				
2006	5	0.00				
2006	6	0.00				
2006	7	1.40				
2006	8	18.88				
2006	9	16.60				
2006	10	0.36				
2006	11	0.33				
2006	12	0.22				

## Anexo B. Balances promedio por periodo en las CMA y CMB

Las variables de decisión que se mantienen con valores constantes son:

- Política de operación de la Presa El Molinito, almacenar máximo 30 Mm<sup>3</sup> y liberar agua a razón de 10 m<sup>3</sup>/s
- La capacidad de infiltración en la sección del río Sonora entre ambas presas, 10 m<sup>3</sup>/s
- La demanda anual de la ciudad de Hermosillo, 103 Mm<sup>3</sup> anuales

### *Balance de escenarios sin restricción agrícola y sin recarga artificial en el acuífero de la Yesca*

CMA

Periodo	Superficial								ΔV Hm3 anual
	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Periodo	Subterráneo													ΔV
	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	14.9	17.0	106.4	-47.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.6	16.2	18.8	108.3	-53.0
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	15.2	17.3	106.7	-25.7
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.2	14.9	17.0	106.5	-25.8
5	63.4	16.9	6.1	86.5	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	19.3	21.3	110.7	-24.3

CMB

Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	65.8	8.5		80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	65.8	7.8		79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	65.8	8.3		80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	65.8	10.5		83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	65.8	12.2		85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	tot					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	6.6	42.0		54.8	18.1	6.8	24.9	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.7	-25.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	6.6	42.0		54.5	18.3	7.3	25.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	81.3	-26.9
3	1.5	0.0	4.7	6.2	6.6	42.0		54.8	18.1	6.4	24.5	15.0	47.4	62.4	29.5	32.9	86.9	-32.1
4	2.3	0.0	5.1	7.4	6.6	42.0		56.0	18.6	6.1	24.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.4	-24.5
5	2.5	0.0	5.1	7.6	6.6	42.0		56.2	18.1	6.0	24.1	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	79.9	-23.7

**Balace de escenarios sin restricción agrícola y con recarga artificial en el acuífero de la Yesca de 22Mm3**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	10.1	12.0	101.5	-42.3
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.4	12.2	14.6	104.0	-48.8
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	11.3	13.3	102.7	-21.7
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	11.2	13.3	102.7	-22.0
5	63.4	16.9	6.1	86.5	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.9	11.6	13.5	103.0	-16.5

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	5.1	8.5	60.7	80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	5.1	7.8	60.7	79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	5.1	8.3	60.7	80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	5.1	10.5	60.7	83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	5.1	12.2	60.7	85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	tot					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	3.2	60.7	78.5	26.0	5.2	31.2	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.9	-8.4
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	3.2	60.7	78.1	24.9	6.1	31.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.8	-8.6
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	3.2	60.7	78.5	24.6	4.6	29.2	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.0	-6.5
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	3.2	60.7	79.7	24.5	5.6	30.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.8	-6.1
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	3.2	60.7	79.9	23.9	4.3	28.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	84.0	-4.2

**Balance de escenarios sin restricción agrícola y con recarga artificial en el acuífero de la Yesca del total tratado**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	9.3	11.2	100.7	-41.5
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.4	11.7	14.0	103.5	-48.2
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	11.0	12.9	102.4	-21.4
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	10.7	12.8	102.2	-21.5
5	63.4	16.9	6.1	86.5	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.9	10.7	12.6	102.0	-15.6

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	0.0	8.5	65.8	80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	0.0	7.8	65.8	79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	0.0	8.3	65.8	80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	0.0	10.5	65.8	83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	0.0	12.2	65.8	85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									$\Delta V$
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	0.0	65.8	80.3	26.0	5.7	31.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	87.4	-7.1
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	0.0	65.8	80.0	24.9	6.4	31.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	87.1	-7.2
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	0.0	65.8	80.3	24.6	4.9	29.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.3	-5.0
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	0.0	65.8	81.5	24.5	5.9	30.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.1	-4.6
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	0.0	65.8	81.7	23.9	4.9	28.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	84.6	-2.9

**Balance de escenarios con restricción agrícola y sin recarga artificial en el acuífero de la Yesca**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				$\Delta V$ Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	14.9	17.0	106.4	-47.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.5	18.7	79.7	2.7	16.2	18.8	98.6	-43.4
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	19.2	18.7	78.6	2.2	15.4	17.6	96.2	-15.2
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	18.7	18.7	77.0	2.4	15.0	17.4	94.4	-13.7
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	19.3	22.9	84.1	2.3	18.8	21.1	105.2	-18.8

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	65.8	8.5		80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	65.8	7.8		79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	65.8	8.3		80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	65.8	10.5		83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	65.8	12.2		85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									$\Delta V$
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	6.6	42.0		54.8	18.1	6.8	24.9	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.7	-25.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	6.6	42.0		54.5	18.3	7.2	25.5	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	81.3	-26.8
3	1.5	0.0	4.7	6.2	6.6	42.0		54.8	18.1	6.2	24.3	15.0	47.4	62.4	29.5	32.9	86.7	-31.9
4	2.3	0.0	5.1	7.4	6.6	42.0		56.0	18.6	5.8	24.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.1	-24.1
5	2.5	0.0	5.1	7.6	6.6	42.0		56.2	18.1	6.3	24.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.1	-24.0

**Balace de escenarios con restricción agrícola y con recarga artificial en el acuífero de la Yesca de 22 Mm3**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				$\Delta V$ Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3				Extracción a Hermosillo Hm3			total		
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira 2	Seris	Seris 2	total	Pesqueira	Seris			total
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.6	18.7	78.2	2.2	10.3	12.5	90.7	-31.5
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.3	18.7	79.6	2.5	12.3	14.7	94.3	-39.1
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.7	70.4	2.1	12.0	14.1	84.5	-3.5
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.8	69.1	2.2	12.2	14.4	83.5	-2.7
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.3	74.6	2.2	11.8	14.0	88.6	-2.2

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	5.1	8.5	60.7	80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	5.1	7.8	60.7	79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	5.1	8.3	60.7	80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	5.1	10.5	60.7	83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	5.1	12.2	60.7	85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	3.2	60.7	78.5	26.0	5.0	31.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.7	-8.1
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	3.2	60.7	78.1	24.9	5.9	30.9	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.6	-8.5
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	3.2	60.7	78.5	24.6	4.3	29.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	84.7	-6.3
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	3.2	60.7	79.7	24.5	5.0	29.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.2	-5.5
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	3.2	60.7	79.9	23.9	4.1	28.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	83.8	-3.9

**Balace de escenarios con restricción agrícola y con recarga artificial en el acuífero de la Yesca del total de tratado**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.6	18.7	78.2	2.2	9.5	11.7	89.9	-30.7
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.5	18.7	79.7	2.5	11.8	14.3	94.0	-38.8
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.8	70.6	2.1	11.3	13.4	84.0	-2.9
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.8	69.1	2.2	11.6	13.8	82.8	-2.1
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.3	74.6	2.2	11.0	13.2	87.9	-1.4

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	0.0	8.5	65.8	80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	65.8	79.5	5.9	0.0	7.8	65.8	79.5	0.0
3	1.6	12.9	0.0	65.8	80.3	6.2	0.0	8.3	65.8	80.3	0.0
4	3.0	14.9	0.0	65.8	83.6	7.4	0.0	10.5	65.8	83.6	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	0.0	12.2	65.8	85.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	0.0	65.8	80.3	26.0	5.5	31.5	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	87.3	-6.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	0.0	65.8	80.0	24.9	6.3	31.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	87.0	-7.0
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	0.0	65.8	80.3	24.6	4.8	29.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.1	-4.8
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	0.0	65.8	81.5	24.5	5.4	29.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	85.6	-4.1
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	0.0	65.8	81.7	23.9	4.5	28.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	84.2	-2.5

***Balance de escenarios sin restricción agrícola, sin recarga artificial en el acuífero de la Yesca y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo CMA***

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	14.9	17.0	106.4	-47.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.5	15.2	17.7	107.2	-52.0
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.3	15.2	17.5	106.9	-25.9
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.0	13.2	15.2	104.6	-23.9
5	63.4	16.9	6.1	86.5	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.3	19.6	21.9	111.3	-24.9

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.5	96.2	6.3	81.5	8.5		96.2	0.0
2	1.3	12.4	0.0	81.3	95.0	5.9	81.3	7.8		95.0	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.7	96.2	6.2	81.7	8.3		96.2	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.5	99.4	7.4	81.5	10.5		99.4	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.6	101.4	7.6	81.6	12.2		101.4	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	6.6	42.0		54.8	18.1	6.8	24.9	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.7	-25.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	6.6	51.9		64.4	44.7	8.0	52.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	108.5	-44.1
3	1.5	0.0	4.7	6.2	6.6	52.2		64.9	45.1	6.2	51.3	14.1	48.3	62.4	29.5	32.9	113.7	-48.7
4	2.3	0.0	5.1	7.4	6.6	52.1		66.1	47.2	5.8	53.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	108.7	-42.7
5	2.5	0.0	5.1	7.6	6.6	52.1		66.3	43.1	7.3	50.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	106.2	-39.9

***Balace de escenarios sin restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca de 22 Mm3 y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo***  
CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3				Extracción a Hermosillo Hm3			total		
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris		total	
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.5	10.4	11.9	101.4	-42.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.8	11.5	13.3	102.7	-47.5
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.5	11.3	12.8	102.2	-21.2
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.4	9.8	11.1	100.6	-19.8
5	63.4	16.9	6.1	86.5	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.5	11.1	12.6	102.0	-15.6

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.5	96.2	6.3	51.0	11.1	27.8	96.2	0.0
2	1.3	12.4	0.0	81.3	95.0	5.9	50.5	10.8	27.8	95.0	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.7	96.2	6.2	6.1	8.3	75.5	96.2	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.5	99.4	7.4	6.0	10.5	75.5	99.4	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.6	101.4	7.6	6.1	12.2	75.5	101.4	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	3.8	75.5	93.9	53.8	5.2	59.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	114.7	-20.8
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	3.7	75.5	93.4	53.2	6.3	59.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	115.3	-21.9
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	3.9	75.5	94.0	54.7	4.1	58.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	114.5	-20.5
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	3.8	75.5	95.1	55.2	4.4	59.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	114.3	-26.2
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	3.9	75.5	95.4	53.4	4.4	57.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	113.6	-18.2

***Balace de escenarios sin restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca del total tratado y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo***

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Peri odo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.5	10.4	11.9	101.3	-42.1
2	38.3	11.9	5.0	55.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.8	11.4	13.2	102.6	-47.4
3	61.9	13.5	5.6	81.0	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.5	11.4	12.9	102.3	-21.3
4	61.0	14.2	5.5	80.7	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	1.4	9.7	11.0	100.5	-19.8
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.3	74.6	2.2	11.8	14.0	88.6	-2.2

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.5	96.3	6.3	0.0	8.5	81.5	96.3	0.0
2	1.3	12.4	0.0	0.0	13.7	5.9	0.0	-73.5	81.3	13.7	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.7	96.2	6.2	0.0	12.4	77.6	96.2	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.5	99.4	7.4	0.0	10.5	81.5	99.4	0.0
5	3.5	16.4	0.0	65.8	85.6	7.6	5.1	12.2	60.7	85.6	0.0

Subterráneo																		
p eriodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	0.0	81.5	96.1	54.0	5.2	59.2	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	114.9	-18.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	0.0	81.3	95.5	53.3	6.3	59.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	115.4	-19.9
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	0.0	77.6	92.1	54.7	4.0	58.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	114.5	-22.4
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	0.0	81.5	97.2	55.3	4.4	59.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	115.5	-18.3
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	3.2	60.7	79.9	23.9	4.1	28.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	83.8	-3.9

**Balace de escenarios con restricción agrícola, sin recarga artificial en el acuífero de la Yesca y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo CMA**

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	35.4	11.4	19.8	22.9	89.4	2.1	14.9	17.0	106.4	-47.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.5	11.4	19.5	18.8	80.2	2.6	15.3	18.0	98.2	-42.9
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	19.3	18.8	79.0	2.5	15.2	17.7	96.6	-15.6
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.4	10.6	18.7	18.7	77.3	2.3	12.9	15.2	92.4	-11.7
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	19.3	22.9	84.1	2.6	19.3	21.9	106.0	-19.5

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.5	96.2	6.3	81.5	8.5		96.2	0.0
2	1.3	12.4	0.0	81.3	95.0	5.9	81.3	7.8		95.0	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.7	96.2	6.2	81.7	8.3		96.2	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.5	99.4	7.4	81.5	10.5		99.4	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.6	101.4	7.6	81.6	12.2		101.4	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	6.6	42.0		54.8	18.1	6.8	24.9	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	80.7	-25.9
2	1.2	0.0	4.7	5.9	6.6	51.9		64.4	44.7	7.7	52.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	108.1	-43.8
3	1.5	0.0	4.7	6.2	6.6	52.2		64.9	45.1	6.1	51.2	14.1	48.3	62.4	29.5	32.9	113.6	-48.6
4	2.3	0.0	5.1	7.4	6.6	52.1		66.1	47.2	5.9	53.1	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	108.9	-42.8
5	2.5	0.0	5.1	7.6	6.6	52.1		66.3	43.1	7.5	50.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	106.3	-40.1

**Balace de escenarios con restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca de 22 Mm3 y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo**  
CMA

Superficial										
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas anuales				Hm3	ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total		
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8	
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8	
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7	
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7	
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4	

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción Agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.2	18.7	77.7	3.5	20.4	23.9	101.6	-42.4
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.2	18.7	79.4	3.9	21.1	25.0	104.4	-49.2
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.7	70.4	3.5	20.7	24.1	94.5	-13.5
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.7	68.9	3.7	20.9	24.6	93.5	-12.8
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.1	74.5	3.2	20.4	23.7	98.1	-11.7

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	80.7	95.4	6.3	5.3	8.5	75.3	95.4	0.0
2	1.3	12.4	0.0	80.4	94.1	5.9	5.3	7.8	75.0	94.1	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.2	95.7	6.2	5.7	8.3	75.5	95.7	0.0
4	3.0	14.9	0.0	80.9	98.8	7.4	5.6	10.5	75.4	98.8	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.0	100.8	7.6	5.6	12.2	75.4	100.8	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			Agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	3.4	75.3	93.3	31.0	11.8	42.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	98.6	-5.3
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	3.4	75.0	92.6	30.9	12.5	43.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	99.1	-6.5
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	3.7	75.5	93.7	31.1	12.0	43.1	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	98.8	-5.2
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	3.6	75.4	94.7	31.7	11.0	42.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	98.5	-3.8
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	3.6	75.4	94.9	30.6	11.0	41.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	97.4	-2.5

**Balace de escenarios con restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca del total tratado y con incremento sostenido de la demanda de Hermosillo**

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.2	18.7	77.7	3.5	20.0	23.5	101.2	-42.0
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.2	18.7	79.4	4.1	22.0	26.1	105.5	-50.3
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.7	70.4	3.6	21.7	25.3	95.7	-14.7
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.7	68.9	3.9	21.8	25.7	94.6	-13.9
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	20.6	73.9	3.4	21.9	25.3	99.3	-12.8

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.5	96.3	6.3	0.0	9.4	80.7	96.3	0.0
2	1.3	12.4	0.0	80.1	93.8	5.9	0.0	7.8	80.1	93.8	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.1	95.6	6.2	0.0	8.3	81.1	95.6	0.0
4	3.0	14.9	0.0	80.8	98.7	7.4	0.0	10.5	80.8	98.7	0.0
5	3.5	16.4	0.0	80.8	100.6	7.6	0.0	12.2	80.8	100.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza-yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	0.0	80.7	95.2	31.0	12.0	43.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	98.7	-3.5
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	0.0	80.1	94.3	28.1	13.2	41.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	97.1	-2.8
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	0.0	81.1	95.6	28.3	12.8	41.1	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	96.9	-1.3
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	0.0	80.8	96.5	28.8	12.1	40.8	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	96.6	-0.1
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	0.0	80.8	96.7	27.9	11.6	39.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	95.3	1.4

***Balace de escenarios con restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca de 22 Mm3, incremento sostenido de la demanda de Hermosillo y con incremento en la capacidad de extracción del acuífero Bagotes***

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.2	18.7	77.7	3.5	19.2	22.7	100.4	-41.2
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.3	18.7	79.6	3.9	19.7	23.6	103.2	-48.0
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.7	70.4	3.5	19.6	23.0	93.4	-12.4
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.7	68.9	3.7	19.9	23.6	92.4	-11.7
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.1	74.5	3.2	18.8	22.0	96.5	-10.0

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anual
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	81.8	96.6	6.3	6.3	8.5	75.5	96.6	0.0
2	1.3	12.4	0.0	81.7	95.4	5.9	6.2	7.8	75.5	95.4	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.8	96.4	6.2	6.3	8.3	75.5	96.4	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.8	99.7	7.4	6.2	10.5	75.5	99.7	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.8	101.6	7.6	6.3	12.2	75.5	101.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales								ΔV	
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltración de zona agrícola la Yesca	Infiltración de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			agrícola en frontera	Flujo de salida		total
	Arroyo la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	4.0	75.5	94.1	31.0	15.1	46.1	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.9	-7.8
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	4.0	75.5	93.7	30.9	16.7	47.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	103.4	-9.7
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	4.0	75.5	94.1	31.1	14.5	45.6	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.3	-7.2
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	4.0	75.5	95.3	31.7	13.7	45.4	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.2	-5.9
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	4.0	75.5	95.5	30.6	14.4	45.0	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	100.8	-5.3

***Balace de escenarios con restricción agrícola, con recarga artificial en el acuífero de la Yesca del total tratado, incremento sostenido de la demanda de Hermosillo y con incremento en la capacidad de extracción del acuífero Bagotes***

CMA

Superficial									
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales				ΔV Hm3 anual
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón	Total	Extracción a Hermosillo	Evaporación en vasos	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Total	
1	108.2	48.2	6.9	163.3	58.4	36.9	59.2	154.5	8.8
2	101.1	43.8	6.8	151.6	55.0	36.6	55.2	146.8	4.8
3	130.9	46.4	7.1	184.4	58.5	40.2	81.0	179.8	4.7
4	133.1	46.3	6.9	186.4	58.8	42.2	80.7	181.7	4.7
5	134.4	54.0	7.4	195.8	59.7	43.3	86.5	189.4	6.4

Subterráneo														
Periodo	Entradas Hm3 anuales				Salidas Hm3 anuales									ΔV
	Recarga de ríos			total	Extracción agrícola Hm3					Extracción a Hermosillo Hm3			total	
	Río Sonora	Río San Miguel	Río Zanjón		Pesqueira	Pesqueira2	Seris	Seris2	total	Pesqueira	Seris	total		
1	41.0	12.7	5.5	59.2	29.4	10.6	19.6	18.7	78.2	2.2	10.0	12.2	90.4	-31.1
2	38.3	11.9	5.0	55.2	30.2	11.4	19.3	18.7	79.6	3.9	18.9	22.8	102.3	-47.1
3	61.9	13.5	5.6	81.0	29.9	10.9	10.9	18.7	70.4	3.5	18.7	22.2	92.6	-11.6
4	61.0	14.2	5.5	80.7	29.1	10.6	10.6	18.7	68.9	3.7	19.5	23.2	92.1	-11.4
5	63.4	16.9	6.1	86.5	30.5	11.4	11.4	21.1	74.5	3.2	18.6	21.9	96.3	-9.9

CMB

Superficial											
Periodo	Entradas Hm3 anuales					Salidas Hm3 anuales					ΔV Hm3 anua l
	Arroyo la Manga	Arroyo la Poza	Río Sonora bajo Abelardo	Agua residual (planta de tratamiento después de Hilo)	Total	Recarga de acuíferos proveniente de ríos	Abastecimiento de zona agrícola la Yesca	Escurrimiento superficial	Agua desviada a obra de recarga en acuífero la Yesca	total	
1	1.5	13.2	0.0	65.8	80.5	6.3	0.0	8.5	65.8	80.5	0.0
2	1.3	12.4	0.0	81.7	95.4	5.9	0.0	7.8	81.7	95.4	0.0
3	1.6	12.9	0.0	81.8	96.4	6.2	0.0	8.3	81.8	96.4	0.0
4	3.0	14.9	0.0	81.8	99.7	7.4	0.0	10.5	81.8	99.7	0.0
5	3.5	16.4	0.0	81.8	101.6	7.6	0.0	12.2	81.8	101.6	0.0

Subterráneo																		
Periodo	Entradas Hm3 anuales								Salidas Hm3 anuales									$\Delta V$
	Recarga del río Sonora y arroyos Hm3				Flujo horizontal poza- yesca	Infiltració n de zona agrícola la Yesca	Infiltració n de obras de recarga	total	Extracción a Hermosillo			Flujo a frontera			agrícola en frontera	Flujo de salida	total	
	Arroyo o la Manga	Río Sonora	Arroyo la poza	total					Bagotes	Yesca	total	Bagotes	Yesca	total				
1	1.3	0.0	5.0	6.3	8.3	0.0	65.8	80.3	26.0	5.2	31.2	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	86.9	-6.6
2	1.2	0.0	4.7	5.9	8.3	0.0	81.7	95.9	30.9	17.4	48.3	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	104.0	-8.1
3	1.5	0.0	4.7	6.2	8.3	0.0	81.8	96.3	31.1	15.1	46.2	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.9	-5.6
4	2.3	0.0	5.1	7.4	8.3	0.0	81.8	97.5	31.7	14.0	45.7	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.5	-4.0
5	2.5	0.0	5.1	7.6	8.3	0.0	81.8	97.7	30.6	14.8	45.5	16.4	39.4	55.8	29.5	26.2	101.2	-3.5