

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**METODOLOGÍA PARA
EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RESULTADOS
EN MODELOS HIDROLÓGICOS INTEGRADOS**

DAMARIS ORPHANÓPOULOS STEHR¹
PASCAL DUMOULIN WEITZEL²

RESUMEN

La generación de resultados en los modelos de simulación integrados superficiales-subterráneos es masiva. Su obtención en algunos modelos es fácil y directa, y en otros es tortuosa, pero, en todo caso, su enorme cantidad dificulta el aprovechamiento pleno de su contenido. Sin embargo, para declarar que un modelo es apto para representar un sistema, se considera absolutamente necesario verificar que la herramienta calcula lo que el modelador ha querido calcular, y representa las características del flujo, a lo largo y ancho de todo el sistema modelado. Para ello, a partir de la experiencia con los modelos MAGIC y WEAP, el equipo especialista de RODHOS ha desarrollado una metodología de análisis visual de resultados que permite obtener una mirada sistemática, integradora y global del sistema modelado, mediante la extracción y organización de la gran cantidad de información de salida, y la reunión de variables afines en gráficos. Esta metodología de análisis facilita la comprensión de lo que el modelo está calculando, la corrección de eventuales errores de conceptualización en la modelación, el enfoque adecuado del proceso de calibración y la comparación del comportamiento de todas las variables entre los diferentes escenarios, histórico y futuros.

¹Socia y Gerente General de RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda. – damarisorph@gmail.com

²Especialista Modelación y Capacitación, RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda. – pascal.rodhos@gmail.com

1. EXPERIENCIA CON EL MODELO MAGIC

La primera vez que el equipo de RODHOS trabajó en forma sistemática con un modelo de simulación hidrológica integrada, fue con ocasión del estudio CAZALAC / RODHOS 2006. En esa oportunidad, el modelo utilizado y desarrollado para las tres cuencas Elqui, Limarí y Choapa, fue el modelo MAGIC de la DGA (MOP-DGA 2005), el cual se volvió a utilizar en el estudio de CONIC-BF 2013.

Datos de entrada

Dicho modelo está estructurado de forma de recibir los datos de entrada de cada cuenca o sistema modelado, en la forma de 48 o 51 matrices (dependiendo de la versión), completamente estructuradas, según se aprecia en la Figura 1. Algunas de ellas contienen la topología de la cuenca modelada, mientras que otras, los parámetros, constantes y estadísticas requeridas para la modelación.

| MATRICES MAGIC (v 1.9 sp) | | | | Total: 51 matrices | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| RIOS | SECT RIEGO | ACUIFEROS | CANALES | POZOS | APORTES | EMBALSES |
| NO PARAM | CULT TIPOS | AC PARAM | CA DER | PO PARAM | AN PARAM | EM CA |
| RI PARAM | MR TIPOS | AC QZS | CA PARAM | PO Q | CL PARAM | EM DEMGE |
| RI TRAMOS | ZR CULT ETP | AC QZV | CA TRAMOS | PO USOS | ESTAD Q | EM FV |
| SECCIONES | ZR CULT PAR | AC QZVE | CP PARAM | | ESTAD PP | EM NODOS |
| | ZR CULT PEF | | CP Q | | DP PARAM | EM PARAM |
| | ZR CULT SC | | CP RETORNOS | | DP Q | EM QGENMAX |
| | ZR DERR | CENTRALES | NO DIST | | | EM QV |
| | ZR AC NNM | | NO DIST Q | | | EM SALIDAS |
| | ZR ANC NNM | CH PARAM | | | | EM SVH |
| | ZR PARAM | CH Q | | | | EM TASEV |
| | ZR QPR | | | | | QE PARAM |
| | ZR SR | | | | | |
| 4 | 12 | 6 | 8 | 3 | 6 | 11 |

Figura 1. Matrices de entrada modelo MAGIC

Variables modeladas

La Tabla 1 muestra la cantidad de elementos de cada tipo en cada modelo. La Figura 2 muestra un sector de modelación con todos los elementos que lo conforman, y sus variables asociadas.

Tabla 1. Cantidad de elementos de cada modelo

| Elementos | Elqui | Limarí | Choapa |
|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| Nodos | 21 | 53 | 37 |
| Tramos de río | 20 | 49 | 36 |
| Zonas de riego | 12 | 44 | 28 |
| Sectores acuíferos | 12 | 30 | 26 |
| Tramos de canales o derivados | 29 | 110 | 103 |
| Embalses | 2 | 3 | 2 |
| Pozos | 26 | 65 | 36 |
| Subcuencas aportantes | 22 | 46 | 35 |
| Matrices de datos | 48 | 51 | 48 |
| Matrices de resultados | 160 | 496 | 353 |

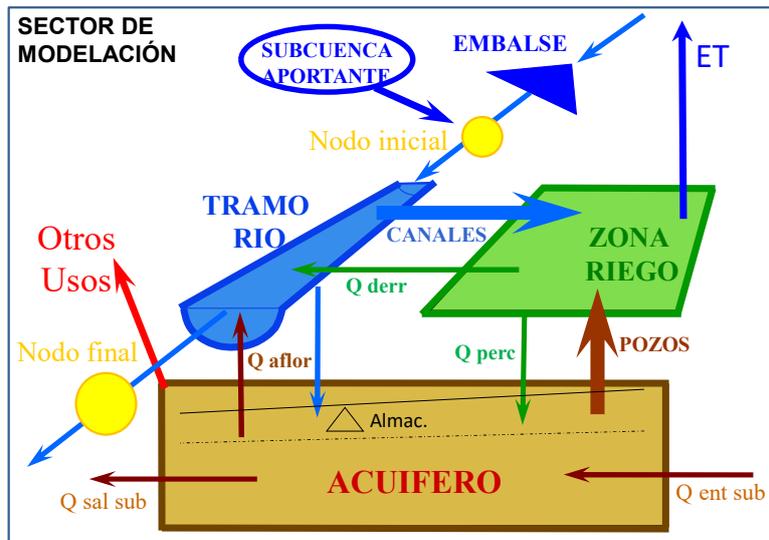


Figura 2. Sector de modelación

Resultados

El modelo MAGIC guarda todos los resultados en archivos que se ubican dentro de una carpeta llamada "resultados", que tiene el aspecto de la Figura 3. Mientras más elementos compongan el sistema, más archivos de resultados contendrá esta carpeta. Considerando que en cada archivo o matriz de resultados hay entre 3 y 10 series de resultados, se obtiene una idea de la cantidad de información de salida que un modelo de este tipo genera.

En el caso del modelo MAGIC, la estructura de estas matrices de resultados es independiente de la topología. En cada matriz, siempre se despliegan las mismas variables de resultados, cualquiera sea la topología. Por ejemplo, en el archivo AC-01.txt, correspondiente al balance del acuífero AC-01, la variable caudal de bombeo de riego, señalada en amarillo en la Figura 4, estará siempre en la matriz de resultados de todos los acuíferos, y aparecerá en cero cuando no haya pozos de bombeo. Cada acuífero modelado generará una matriz de resultados del mismo tipo.

Si se considera que el modelo genera esta cantidad de resultados, y que lo que pretendemos es que ellos tengan algún sentido físico, entonces será necesario monitorearlos durante el proceso de modelación.

La estructura de resultados del modelo MAGIC es muy apta para el monitoreo. Basado en ella, en el estudio de CAZALAC / RODHOS 2006, RODHOS desarrolló una metodología de análisis y presentación, vale decir, de explotación de resultados, que ha ido perfeccionando con el tiempo, y también, aplicando a los resultados de otros modelos, como los del modelo WEAP.

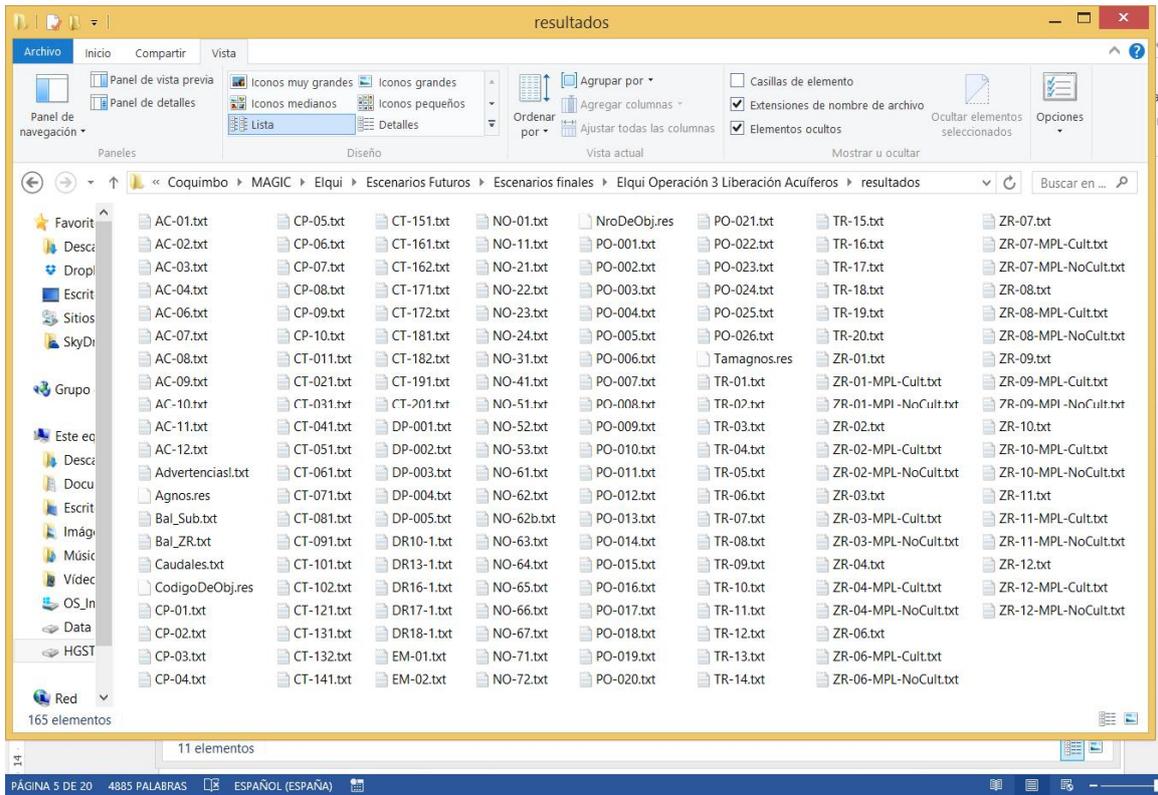


Figura 3. Contenido carpeta de resultados

| Código | Año | Mes | Vini | Qze1 | Qzve1 | Qzs1 | Qze2 | Qzve2 | Qzs2 | Qzve | Qze | Qzr | QzbT | Qzbr | Qzbo | Qzs | Qzv | Qvf | Vfin |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| | [Mm3] | [m3/s] | [Mm3] | | |
| AC-01 | 2004 | ABR | 5.4324 | 0 | 0 | 0.088 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.645 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.087 | 0.5 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | MAY | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.557 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.412 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | JUN | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.677 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.533 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | JUL | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.581 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.437 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | AGO | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.602 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.457 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | SEP | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.627 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.483 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | OCT | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.62 | 0.08 | 0.022 | 0.058 | 0.086 | 0.453 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | NOV | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.743 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.598 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | DIC | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.733 | 0.088 | 0.03 | 0.058 | 0.086 | 0.559 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | ENE | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.738 | 0.077 | 0.019 | 0.058 | 0.086 | 0.575 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | FEB | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.699 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.555 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2004 | MAR | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.575 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.431 | 2.067 | 5.4324 |
| AC-01 | 2005 | ABR | 5.4324 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.086 | 0 | 0 | 0.551 | 0.058 | 0 | 0.058 | 0.086 | 0.406 | 2.067 | 5.4324 |

Figura 4. Matriz Balance del acuífero AC-01

2. EXPERIENCIA CON EL MODELO WEAP

La experiencia con el modelo WEAP se obtuvo a partir del estudio desarrollado para la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo, RODHOS 2014, llamado a licitación con fondos FIA.

La obtención de resultados a partir del modelo WEAP (SEI 2015) no es sistemática ni estandarizada como a partir del modelo MAGIC. Al final del proceso de simulación, el modelo no reúne todos los resultados en una misma carpeta, sino que el modelador debe

obtenerlos uno a uno, a partir de un proceso de búsqueda. Además, la salida de resultados en WEAP presenta las siguientes características, limitantes de la claridad del contenido:

- los nombres de las variables de resultados se modifican al modificar la topología
- el modelo no genera las mismas variables cuando se modifica la topología
- en los gráficos de visualización, la misma variable desplegada para dos elementos distintos, o en dos escenarios distintos, adopta colores diferentes.

Todo ello se menciona para mostrar que no es fácil contar con todos los resultados, y menos aún, en la forma apropiada para hacer el análisis y comparación de escenarios.

Sin embargo, es igualmente necesario realizar el análisis exhaustivo mencionado antes, para dar el modelo por calibrado y apto para simular escenarios.

El trabajo realizado con ambos modelos, MAGIC y WEAP, ha permitido reconocer que la presentación y revisión de todos los resultados debe establecerse como un objetivo, debido a la importancia que reviste el hecho de saber qué es lo que el modelo realmente está calculando, en todas sus partes.

3. METODOLOGÍA DE EXPLOTACIÓN DE RESULTADOS

Como ya se ha visto, un modelo integrado como MAGIC o WEAP genera una gran cantidad de resultados en la forma de series de tiempo, a partir de los balances hídricos que realiza para cada elemento del sistema. Es tarea del modelador extraer y explotar toda la información que el modelo genera.

Para ello, se ha desarrollado una metodología de análisis de resultados. La metodología consiste en agrupar la gran cantidad de resultados que el modelo entrega, en una forma lógica, esto es, en grupos de variables relacionadas, las cuales se presentan en un solo o varios gráficos asociados, como series de tiempo.

Hasta el momento, tanto para la explotación de resultados de MAGIC como de WEAP, se ha optado por reunir los resultados en planillas Excel, donde se grafican en forma semi-automatizada. Sin embargo, esta metodología podría utilizarse con cualquier otra herramienta que permitiera generar gráficos a partir de datos almacenados en formato de texto, como son por ejemplo los lenguajes de programación R y Python, los que además permitirían automatizar completamente la visualización.

Las planillas en que se han reunido los diferentes grupos de variables, se presentan a continuación.

Planilla de calibración superficial

Esta planilla contiene los resultados de la calibración superficial, esto es, los datos observados en las estaciones existentes y los datos simulados en los mismos puntos, dentro de un mismo gráfico, como se aprecia en la Figura 7. Cada hoja corresponde a una estación de calibración. En todas las hojas se mantiene el mismo formato de datos y gráficos.

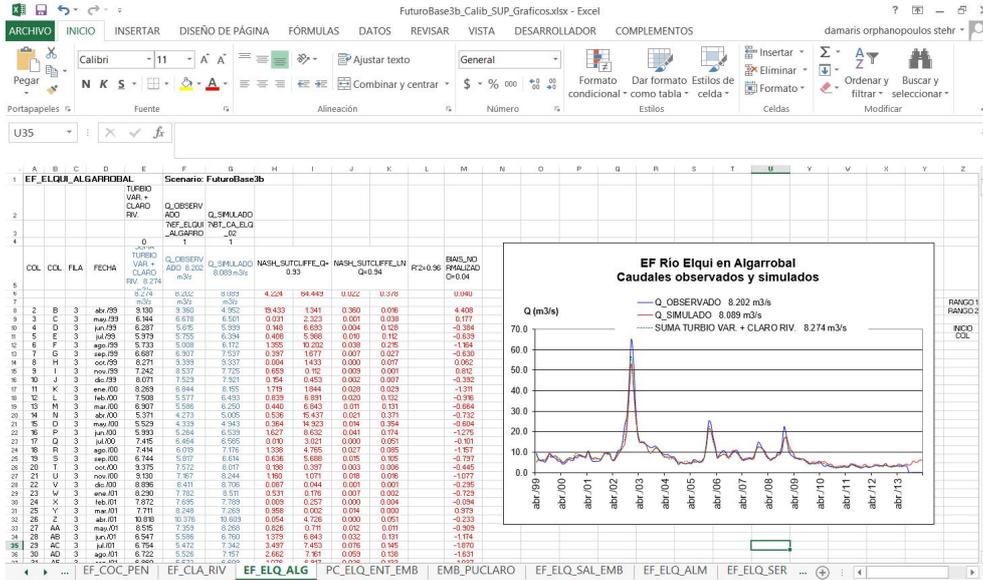


Figura 7. Planilla de calibración superficial

Planilla de calibración subterránea

De manera análoga a la anterior, esta planilla contiene los resultados de la calibración subterránea, esto es, los datos de los pozos de observación, y los datos simulados en los mismos acuíferos, en un mismo gráfico, como se aprecia en la Figura 8. En esta planilla, los volúmenes simulados han sido transformados en nivel estático, para poder ser comparados con los niveles observados en los pozos de observación. Cada hoja corresponde a un acuífero. En todas las hojas se mantiene el mismo formato de datos y gráficos.

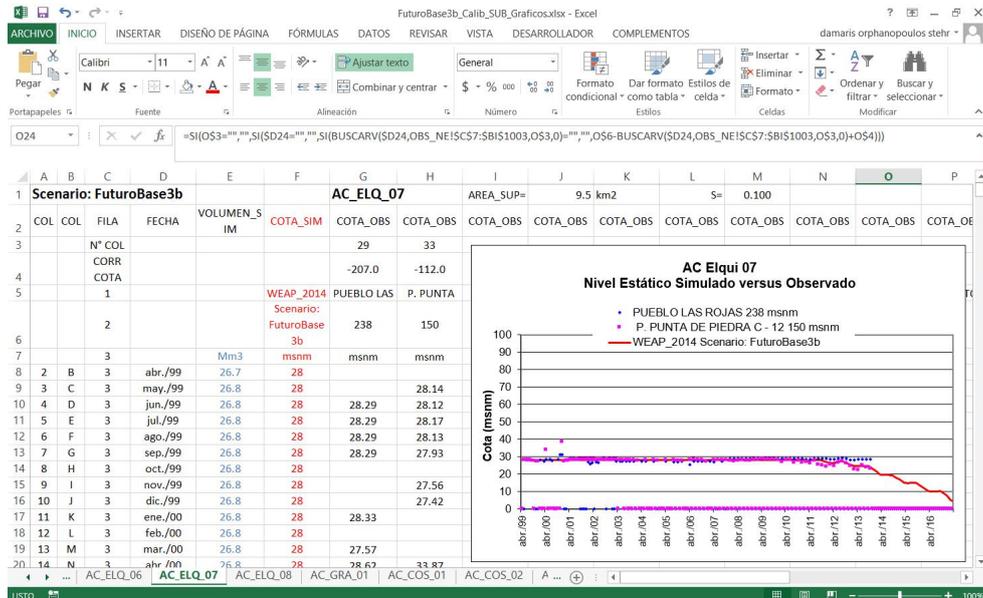


Figura 8. Planilla de calibración subterránea

Planilla balance de zona de riego

Esta planilla contiene, para cada zona de riego, las series de todas las variables relacionadas con ella. En la leyenda de cada variable, además, se incluye el promedio para el período de análisis considerado. Se configura una hoja por cada zona de riego, manteniendo igual el formato de datos, el código de color de las distintas variables y el formato de los gráficos, para todas las zonas de riego. Las variables y resultados son los que se muestran en la Figura 9.



Figura 9. Balance zona de riego

Para su visualización, las variables se agrupan y se grafican de la forma que se muestra en la Figura 10, a continuación. En estos gráficos, se pueden apreciar, para cada zona de riego, al menos los siguientes aspectos:

- Grado de ineficiencia del riego
- Efecto de los cambios en los métodos de riego
- Efecto de los cambios de cultivo y cambios en el área cultivada
- Fase/desfase entre la demanda y la entrega de agua por parte de los canales y pozos
- Detalle de las fuentes de agua en cada zona de riego: canal, pozo, precipitación
- Detalle de la entrega por canal a las diferentes zonas de riego
- Complementariedad entre las fuentes de agua superficial y subterránea
- Tope a la extracción subterránea impuesto por los derechos
- Seguimiento de los caudales entregados: uso consuntivo, percolación, derrame
- Porcentaje de demanda suplida
- Estacionalidad de todos los flujos
- Efectos de la sequía sobre los diferentes flujos
- Efectos de la tecnificación: se reduce la demanda, en general se reduce el bombeo, aumenta la demanda suplida y se reducen las pérdidas.
- Efecto del mejoramiento de canales: mayor entrega, reducción del bombeo, aumento de la demanda suplida, aumento de las pérdidas desde zonas de riego
- Efectos de los embalses o cualquier obra de infraestructura sobre la demanda suplida en las diferentes zonas de riego, y sobre los diferentes flujos.
- Además, se puede comparar fácilmente una zona de riego con otra, o el comportamiento de una misma zona de riego en distintos escenarios.

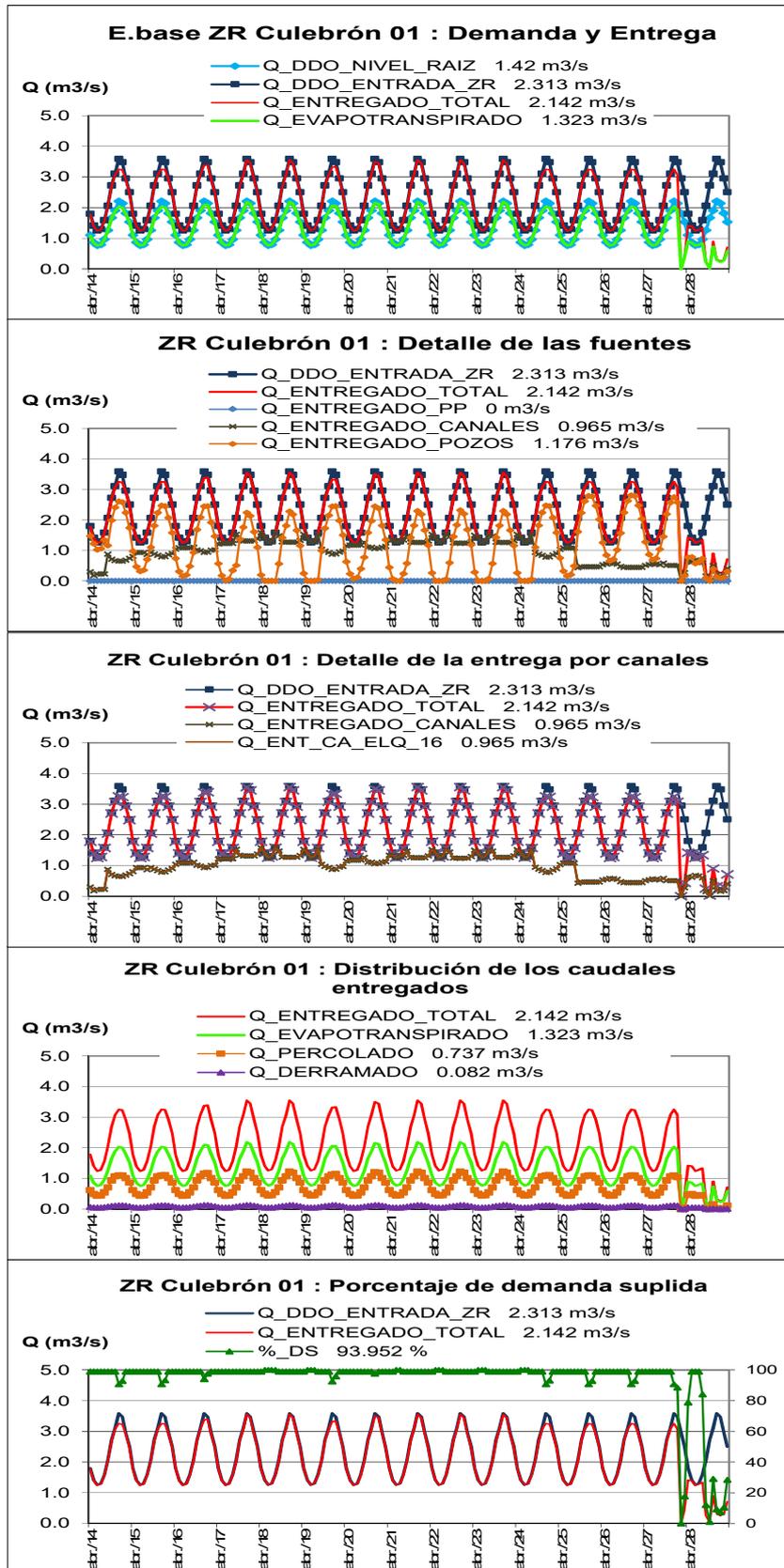


Figura 10. Balance zona de riego en un escenario base

Planilla balance acuifero

Esta planilla contiene, para cada acuífero, las series de todas las variables relacionadas con él. En la leyenda de cada variable, además, se incluye el promedio para el período de análisis considerado. Se configura una hoja por acuífero, manteniendo igual el formato de datos, el código de color de las distintas variables y el formato de los gráficos, para todos los acuíferos. Las variables son las que se presentan en la Figura 11.

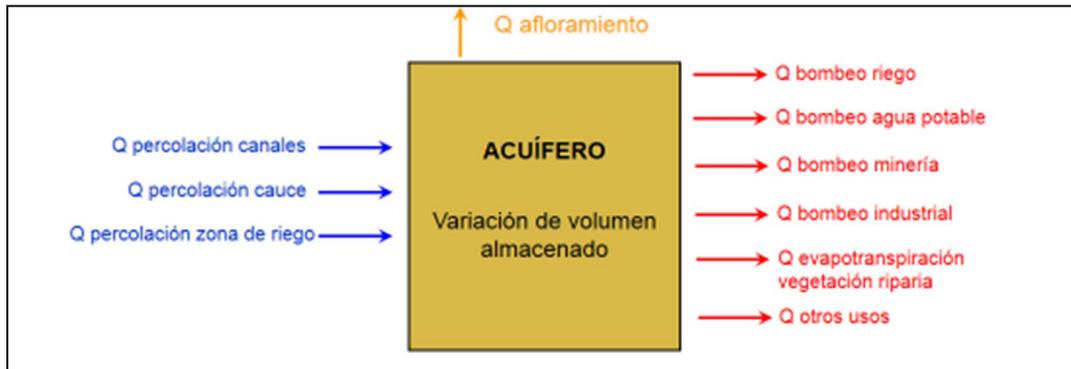


Figura 11. Balance de un acuífero

Para la visualización, las variables se agrupan y se grafican de la forma que se muestra en la Figura N° 12, a continuación. Al observar estas planillas, se pueden apreciar, para cada acuífero, los siguientes aspectos:

- Todas las percolaciones desde las diferentes fuentes hacia el acuífero
- Percolación total disponible o potencial
- Recarga neta o efectiva en cada condición
- Relación entre el estado del acuífero y los afloramientos. Cuando el acuífero está lleno, la recarga disponible aflora y la recarga neta es igual a las extracciones. Cuando el acuífero no está lleno, como en este caso, acepta toda la recarga disponible y no hay afloramientos.
- Efecto de medidas como mejoramiento de canales, afecta negativamente los acuíferos antes beneficiados por las pérdidas de percolación, beneficia los acuíferos bajo sectores de riego ahora beneficiados por mayores caudales y el efecto sobre el bombeo, en general reducción del bombeo.
- Efecto de medidas como tecnificación del riego sobre las percolaciones y el bombeo (en general reducción de ambos).
- Efecto de medidas como la liberación de acuíferos.
- Además, se puede comparar fácilmente un acuífero con otro, o el comportamiento de un mismo acuífero en distintos escenarios.

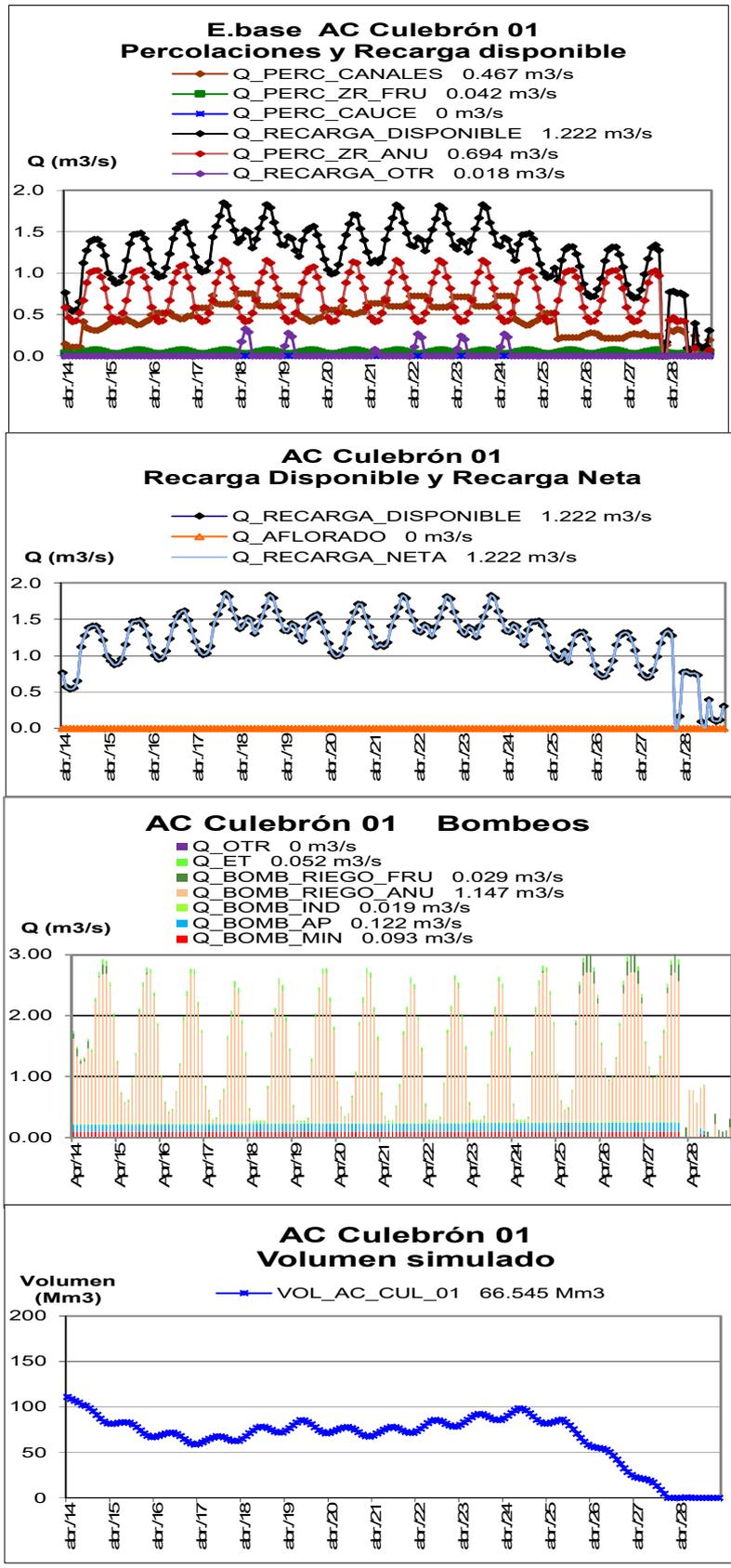


Figura N° 12. Balance Acuífero en un escenario base

Planilla Balance Canales

Esta planilla contiene, para cada canal, las series de todas las variables relacionadas con él. En la leyenda de cada variable, además, se incluye el promedio para el período de análisis considerado. Se configura una hoja por canal modelado, manteniendo igual el formato de datos, el código de color para las distintas variables y el formato de gráfico, para todos los canales. Las variables son las que se presentan en la Figura 13.

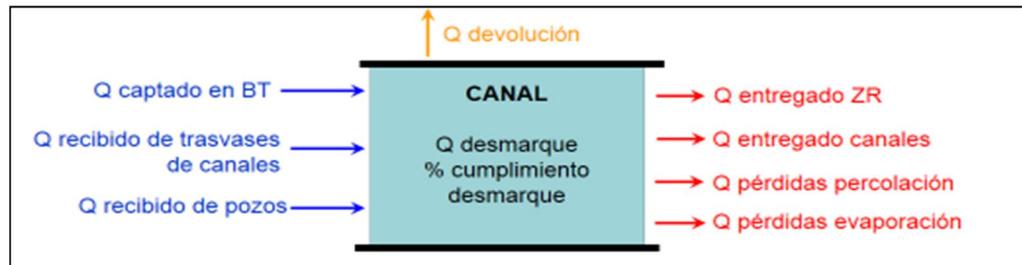


Figura 13. Balance de un canal

Para la visualización, las variables se agrupan y se grafican de la forma que se muestra en la Figura 14, a continuación. Al observar estas planillas, se pueden apreciar, para cada canal, los siguientes aspectos:

- La variación del porcentaje de desmarque con el tiempo
- El caudal asociado al porcentaje de desmarque en cada momento
- El cumplimiento del porcentaje de desmarque en el canal
- La importancia relativa de los caudales entregados y las pérdidas de conducción
- La forma en que se reparte el caudal entre las diferentes zonas de riego que el canal sirve
- Cómo evoluciona todo lo anterior durante una sequía
- La reducción de pérdidas cuando un canal es mejorado
- El aumento de los caudales entregados a las zonas de riego cuando un canal es mejorado
- La reducción del caudal portado cuando una zona de riego es tecnificada
- Además se puede comparar fácilmente un canal con otro, o el comportamiento de un mismo canal en diferentes escenarios.

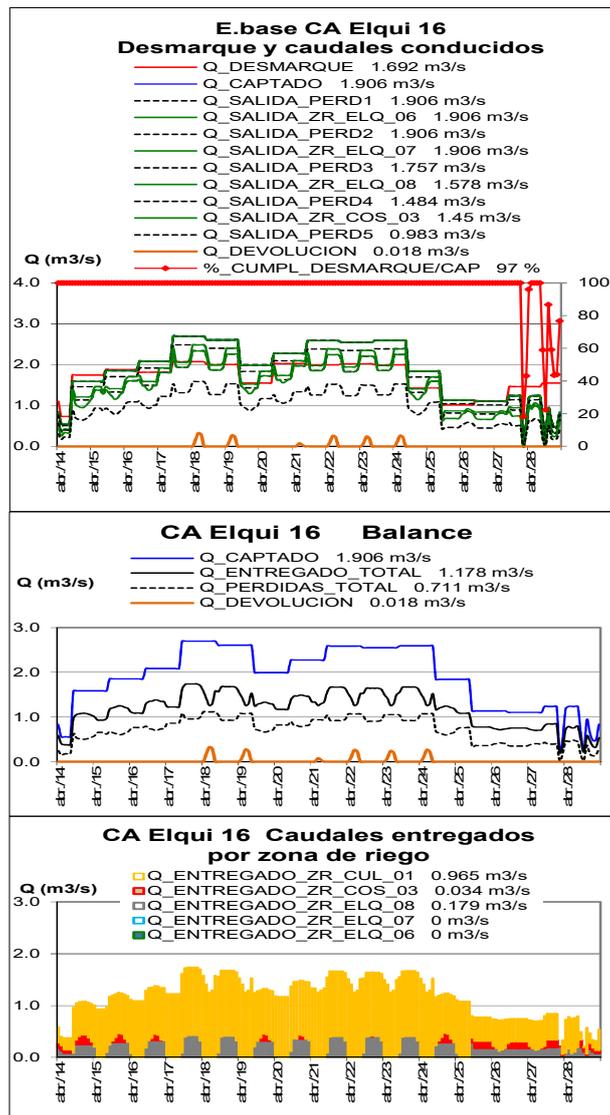


Figura 14. Balance Canal en un escenario base

Planilla caudal de salida al mar

Esta planilla presenta la suma de todos los caudales que configuran la salida al mar desde una cuenca, y tiene interés para evaluar el efecto de retención del recurso hídrico que tienen las diversas medidas de aumento de eficiencia en el uso del agua, estructurales o no estructurales, que se prueban con los diferentes escenarios de un modelo. Las variables involucradas son las de la Figura 15.

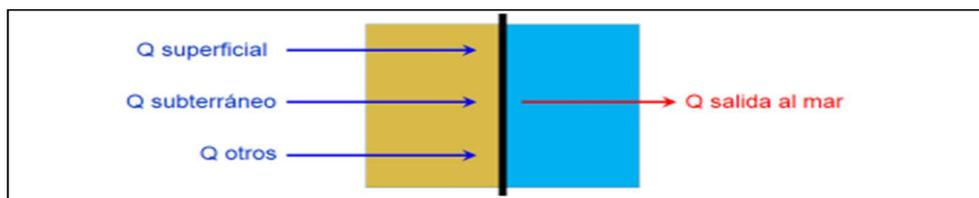


Figura 15. Salida al mar

Para la visualización, se genera una planilla donde se grafican las variables involucradas, como se muestra en la Figura 16, al final del capítulo, lo que permite comparar escenarios.

Al observar estos gráficos, se pueden apreciar los siguientes aspectos:

- La importancia de cada componente en el caudal total de salida al mar
- La variación de cada componente en el tiempo
- La variación de la salida superficial en función del escenario
- La variación de la salida subterránea en función del escenario
- La variación del comportamiento de las componentes en el tiempo, en sequía, períodos húmedos, etc.
- La comparación de esta variable en distintos escenarios.

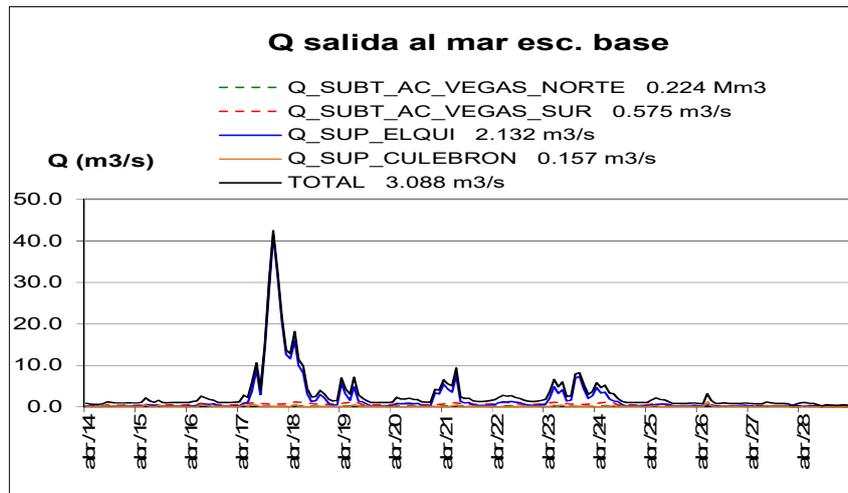


Figura 16. Caudal de salida al mar, en un escenario base

4. CONCLUSIONES

- Un modelo integrado de simulación como MAGIC o WEAP genera una gran cantidad de resultados en la forma de series de tiempo, a partir de los balances hídricos que realiza para cada elemento del sistema.
- Si se pretende que esos resultados tengan algún sentido físico, entonces será necesario monitorearlos durante el proceso de modelación. Por ello, el trabajo de extraerlos, visualizarlos y analizarlos, vale decir, explotarlos, y luego aprobarlos, es un paso necesario para dar un modelo por calibrado y poder pasar a la etapa siguiente, de evaluar escenarios.
- Si sólo se observan algunos resultados, no es posible apreciar que el set de resultados sea coherente y responda a los supuestos de modelación.
- La metodología propuesta permite una mirada sistemática sobre todos los resultados generados para cada elemento de la modelación, en base a una explotación exhaustiva, una agrupación lógica, y una visualización que mantiene el mismo formato de gráfico para cada tipo de elemento (zona de riego, acuífero, canal), y el mismo código de color para cada una de las variables involucradas.

- Los resultados muchas veces son intuitivos, y permiten al modelador corroborar lo que ya sabía. Sin embargo, muchas veces no son intuitivos, pero lógicos, y aportan enseñanza al modelador sobre la forma en que se comporta el sistema modelado bajo determinadas condiciones. Ésta es la verdadera utilidad de un modelo.
- El concepto de la metodología presentada se puede aplicar a otros modelos integrados, como también a otros tipos de modelos, por ejemplo de aguas subterráneas (como Modflow), de modo de hacer visible y poder hacerse cargo de todo lo que el modelo está calculando.

REFERENCIAS

CAZALAC / RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda., 2006. “Aplicación de metodologías para la determinación de la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso: Región de Coquimbo”, para Gobierno Regional.

CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores con RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda, 2013. “Diagnóstico Plan Maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo”, para Gobierno Regional.

RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda., 2014. “Estudio de modelos de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, para las cuencas de las provincias de Elqui, Limarí y Choapa”, para Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo.

Ministerio de Obras Públicas – Dirección General de Aguas, MOP-DGA, 2005. “MAGIC: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas-Manual de Referencia Técnica, versión 1.0”

Ministerio de Obras Públicas – Dirección General de Aguas, MOP-DGA, 2005. “MAGIC: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas-Manual de Usuario, versión 1.0”

Stockholm Environment Institute, SEI 2015. "WEAP Water Evaluation And Planning System-User Guide for WEAP 2015"