

MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS: HERRAMIENTAS DE APOYO EN LA TOMA DE DECISIONES DENTRO DEL MARCO LEGAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

ANA MARÍA GANGAS P.¹, RODRIGO ROJAS MUJICA² Y LILIANA PAGLIERO CARO³

RESUMEN

Desde la década de los 70 la Dirección General de Aguas ha venido desarrollando programas orientados a conocer el uso del recurso, a través de catastros de usuarios de aguas, estudios de diagnóstico del uso del recurso, y en la última década un programa sistemático de la evaluación de los recursos hídricos; esto ha permitido disponer de modelos matemáticos que predicen la respuesta de una cuenca hidrográfica frente a diversas situaciones de demanda, tanto respecto de los recursos superficiales como subterráneos.

Por otra parte, la creciente presión sobre el recurso ha generado una mayor complejidad en su gestión y la necesidad de plantear distintos escenarios de uso para períodos a largo plazo, de 30 a 50 años de análisis.

Es por esto que la DGA recurre y elabora "Modelos de Simulación Hidrológicos e Hidrogeológicos" como una herramienta de apoyo frente a decisiones que la autoridad debe tomar.

Actualmente en las cuencas del río San José, Pampa del Tamarugal, ríos Ligua, Petorca, Aconcagua, Valle de Casablanca, río Maipo, Maule, Imperial y sectores costeros de la IV y VI Región, se dispone de herramientas matemáticas de este tipo.

El trabajo que a continuación se presenta describe en su primera parte y de manera general qué es un modelo de simulación y para qué sirve, cuáles son ventajas y características de operación y respuesta.

En una segunda parte se ha querido mostrar un ejemplo de aplicación realizado el presente año por el Departamento de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas, donde era primordial saber el comportamiento del sis-

tema y oferta de agua que la "cuenca del río Aconcagua" podía entregar considerando la gran demanda de derechos de aprovechamiento en esa región.

¿QUÉ ES UN MODELO DE SIMULACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS?

Un modelo de simulación de aguas no es más que una representación matemática de la hidrología, ya sea superficial o subterránea de un sector, en donde se idealiza y simplifican las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas que permitan la descripción de las condiciones y procesos más importantes de una cuenca.

Para un modelo de simulación hidrológico, y el usado en nuestro caso, Modelo Operacional del Sistema M.O.S., este consiste en un conjunto de elementos regidos por la ecuación de continuidad y vinculados entre ellos a través de las respectivas entradas y salidas. Estos elementos corresponden a los nodos, sectores de riego, acuíferos, embalses superficiales, tramos de río, canales de trasvase, nodos de distribución, sectores de agua potable y los caudales externos (cuencas laterales). La metodología empleada en la simulación de estos elementos permite generar el caudal en los puntos de interés de ríos y esteros definidos como nodos en el sistema. En los sectores de riego se incluyen procesos tales como el reúso de derrames de riego, lo que implica mayor eficiencia a nivel de sector. Las percolaciones obtenidas en los sectores de riego, canales, tramos de río y esteros constituyen recargas para los acuíferos, cuyas descargas se simulan combinando la ecuación de Darcy con la ecuación de continuidad.

En el caso de un modelo de simulación hidrogeológico, y específicamente el que se ha venido utilizando por años en la DGA, Visual Modflow, este consiste en una representación matemática del sistema basado en el método de las diferencias finitas que utiliza las ecuaciones

1 Ing. Civil Hidráulico. Ing. Jefe Área Modelación. Departamento Estudios y Planificación. DGA. MOP.
2 Ing. Civil Hidráulico. Área Modelación. Departamento Estudios y Planificación. DGA. MOP.
3 Ing. Civil Hidráulico. Área Modelación. Departamento Estudios y Planificación. DGA. MOP.

fundamentales de flujo y conservación de la masa para simular el flujo de agua subterránea y el transporte de sustancias disueltas. Permite la simulación de un sistema acuífero resolviendo la ecuación de flujo impermanente restringida a condiciones de borde especificadas por el usuario; básicamente lo que entrega son los niveles de agua que tendrá la cuenca en diferentes puntos de interés a través del tiempo.

¿PARA QUÉ SIRVE UN MODELO DE SIMULACIÓN?

Dentro de esta perspectiva, un modelo de simulación de aguas mejora el conocimiento que se tiene del recurso dentro de la cuenca que se está analizando. Esta información dependerá sin duda de los antecedentes previos que se tengan y de la calidad de los datos que se manejen.

Por otra parte, ayuda a predecir diferentes impactos hidrológicos. Mediante distintos escenarios de evaluación se pueden incorporar nuevas obras, cambiar patrones de cultivos, mejorar la eficiencia en el riego, aumentar la explotación incrementando el número de pozos, etc., que permitan visualizar el comportamiento de la cuenca frente a diferentes impactos sin tener que esperar que ocurran para saber la respuesta que tendrá el sistema.

También permite el análisis de riesgos ambientales, frente a descargas de contaminantes o plumas de contaminación, para el caso de modelación de calidad de aguas.

Son muchos más los beneficios que ofrecen los modelos de simulación, pero el más importante de destacar es que es una herramienta de análisis y planificación que permite evaluar situaciones alternativas previas, apoyo básico para la toma de decisiones frente a el otorgamiento de nuevos derechos de aguas.

1. ROL DE LA MODELACIÓN EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Cuando se utiliza un modelo de simulación, está pensado para las diferentes áreas en que puede ser aplicado: manejo de datos, políticas de protección, riesgos, emergencias y soluciones frente a ellas, identificación de fuentes de contaminación, manejo de la calidad de las aguas, y dentro de este, la ubicación de los puntos de monitoreo en que la DGA debe analizar al momento de actualizar, extender y generar nueva información para la comunidad; pero el más importante en estos tiempos es el de la cuantificación de los recursos hídricos en las diferentes cuencas que tiene el país.

2. OBJETIVOS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

Los objetivos de un modelo de simulación pueden ser variados, dependiendo del interés que se tenga en la hoya hidrográfica escogida. Sin embargo, todos apuntan siempre a un objetivo en común, y es el de simplificar el análisis a los problemas que se tienen, en otras palabras, y reiteradas veces ya dicho en este artículo, disponer de una herramienta de análisis que permita caracterizar y evaluar situaciones alternativas que signifique un apoyo para la toma de decisiones relacionadas con el óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos de una cuenca.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Planificación

Dentro de las características se puede mencionar el de la planificación. Los modelos permiten tener una visión de corto y largo plazo analizando situaciones actuales y futuras. Esto se puede lograr, por ejemplo, realizando cambios en los patrones de recarga del sistema, en la calidad de las aguas, efectos que producen la implementación de obras hidráulicas e incrementando la demanda de agua (aumentar número de pozos y solicitudes), entre otros.

Flexibilidad de operación

La flexibilidad en la operación de los modelos es un punto clave. Los modelos deben permitir un manejo fácil al usuario, y la modificación de elementos y parámetros de la manera más rápida y sencilla que permitan responder a las inquietudes que surgen día a día.

No quedan obsoletos

Los modelos que se generan no quedan obsoletos, estos pueden irse actualizando con el pasar de los años, pero esto dependerá directamente de las condiciones que se impongan desde un comienzo (lenguajes de programación, ambiente en que se desarrollan, etc.).

Modelación integrada

Una característica importante es que los modelos pueden traer incorporada una modelación integrada del recurso (M.O.S.), esto es, modelación superficial y subterránea al mismo tiempo. Para esto, el modelo considera sectores de acuíferos conectados con los nodos (puntos en diferentes tramos de ríos), los cuales a su vez se

encuentran conectados con sectores de riego y así quedan estos tres sistemas interconectados para traspasar información entre ellos.
(Ver Esquema).

Modelación conjunta

Existe una serie de modelos comerciales para aguas subterráneas en el mercado. El más usado por la DGA y a nivel internacional es Visual Modflow, el cual necesita información superficial para ejecutarse. Esta información superficial se obtiene con campañas de terreno y datos de estudios e información previos, pero la modelación conjunta, es decir, conseguir la información superficial de los modelos integrados, permite chequear, calibrar y validar ambos modelos, obteniendo así resultados mucho más confiables y fidedignos, y una retroalimentación para ambos.

4. INFORMACIÓN DE LOS MODELOS

Datos de entrada requeridos

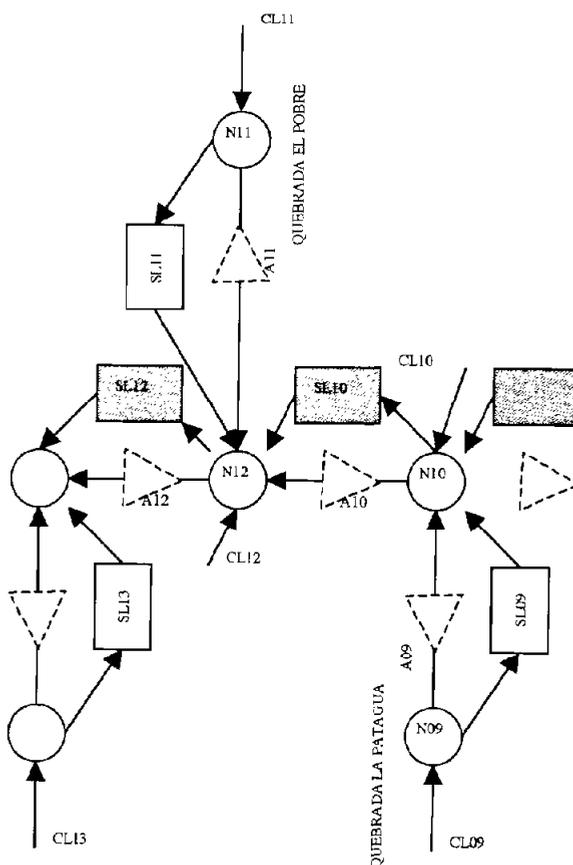
Básicamente corresponden a los antecedentes hidrológicos (precipitaciones y caudales); a

características de los canales y zonas de riego, dentro de estas se pueden destacar las eficiencias prediales y de conducción de canales, superficies de las áreas cultivadas, coeficientes de percolación, etc.; características de los ríos, altura de nivel de aguas, conductividades, cota del lecho, etc.; y datos de los acuíferos. Dentro de este último, es muy importante que la información sea revalidada, ya que capacidades, estados iniciales, geometría de los mismos, permeabilidades, entre otros, son parámetros claves para lograr que los resultados del sistema representen la situación real (por lo menos más de 75%, ya que un modelo nunca será igual a la realidad).

No se debe dejar de nombrar, por supuesto, todo el trabajo de terreno y antecedentes geológicos que permiten una buena delimitación de las fuentes de agua.

Los resultados o datos de salida que ofrecen los modelos.

Agua superficial: (1) Balance completo de la cuenca, es decir, caudal que entra al río, caudal de los canales, lo que percola desde el río, afloramientos, caudal bombeado para riego y otros usos, recargas totales y parciales, volumen final,



entre otros. (2) Para los sectores de riego se pueden obtener resultados de percolaciones, caudales medios mensuales de los canales, porcentaje de satisfacción de la demanda, demandas en bocatoma, etc. (3) Para los acuíferos se pueden obtener los caudales de entrada y salida de cada uno de los sectores acuíferos, recarga total, recargas por riego, río y lluvia, caudal bombeado, etc. (4) En los diferentes nodos y tramos de ríos se pueden conseguir los caudales en los puntos de interés, afloramientos, bombeos y percolaciones. En el caso de la existencia de embalses, este entrega caudales al canal alimentador, afluente al embalse, demanda al embalse, evaporación, vertidos, volúmenes útiles y seguridades de riego.

Agua Subterránea: (1) En este sistema se entregan principalmente los niveles de agua subterránea a través del tiempo. Con esta información el modelo consigue una serie de otros resultados como, por ejemplo, equipotenciales, isodescensos, mapas de contorno, cortes, etc. (2) Flujos y velocidades en toda el área. (3) Trayectoria de partículas.

5. APLICACIÓN A UN CASO REAL: EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

El trabajo involucró adecuar y complementar modelos ya disponibles de la cuenca para su aplicación en la determinación de la oferta subterránea. A partir de la reformulación de las propiedades, parámetros y condiciones existentes se ha logrado una representación del sistema de forma tal de analizar la disponibilidad, considerando un horizonte a largo plazo de 50 años y diferentes escenarios de explotación prevaleciendo las solicitudes de derechos de aguas y lo que el sistema es capaz de entregar. A partir de esto, se obtiene un modelo con una concepción adaptada (Modelo DGA) a partir de los estudios originales realizados para la DOH por Ingendesa - AC en 1998. Los resultados obtenidos permiten determinar los caudales de explotación efectiva sustentables en el largo plazo, los cuales establecen niveles de operación en el acuífero significativamente más profundos a los existentes; asimismo se evalúa el efecto sobre las recuperaciones superficiales en sectores de interés.

5.1 ANTECEDENTES

La cuenca del río Aconcagua abarca una superficie de aproximadamente 7.000[km²]. El régimen hidrológico es de carácter pluvio-nival, con mayores caudales durante la época invernal, período en el cual se concentra más del 90% de las precipitaciones anuales.

La cuenca presenta un importante desarrollo agrícola, que actualmente abarca del orden de 71.000[ha]; siendo además fuente de abastecimiento de agua potable para una población superior a 850.000[hab]. El sector Hidroeléctrico, Industrial y Minero son también actividades relevantes desde el punto de vista de los requerimientos hídricos.

El desarrollo dentro de la cuenca ha implicado una creciente demanda por recursos hídricos subterráneos, situación que ha motivado el desarrollo de diversos estudios orientados a conocer la cuantificación de estos. Dentro de estos estudios se destacan: "Modelo de Simulación Hidrogeológico del Valle del Río Aconcagua", desarrollado por Ingendesa, y "Modelo de Simulación Hidrogeológica del Sector Desembocadura", realizado por AC Ingenieros Consultores, en los años 1998 y 1997, respectivamente.

Los antecedentes consultados y recopilados permiten caracterizar hidrogeológicamente las distintas unidades que componen los rellenos sedimentarios del valle principal, identificando acuíferos de distintas potencialidades de explotación, y caudales característicos en ciertas secciones que permiten validar los resultados obtenidos (ver figura 1). La relación entre la componente superficial y la subterránea se ha obtenido a partir de los resultados entregados por el Modelo de Operación del Sistema (MOS), los cuales han sido validados para cada uno de los modelos desarrollados dentro de un período de simulación de 50 años (período 1950/1999).

En este marco el trabajo se orientaba en efectuar una evaluación de la disponibilidad de aguas subterráneas, a partir de la aplicación de modelos de simulación matemática para la operación hidrológica, los cuales han sido adaptados y mejorados por este Servicio de acuerdo con los antecedentes disponibles y sobre la base de los criterios que emplea la DGA en esta materia.

Los modelos utilizados para alcanzar este objetivo corresponden al Visual Modflow v2.61 y al Modelo Operacional de Sistema, MOS, el cual utiliza entre otros principios la Ley de Darcy y la ecuación de continuidad.

5.2 MARCO PARA LA EVALUACIÓN

5.2.1 Implementación de los modelos

El MOS ha sido ejecutado en condiciones de riego actuales considerando la superficie cultivada y eficiencias intraprediales y extraprediales actuales. No se han incluido mayores modificaciones a las superficies netas cultivadas en base a los estudios anteriormente mencionados.

SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

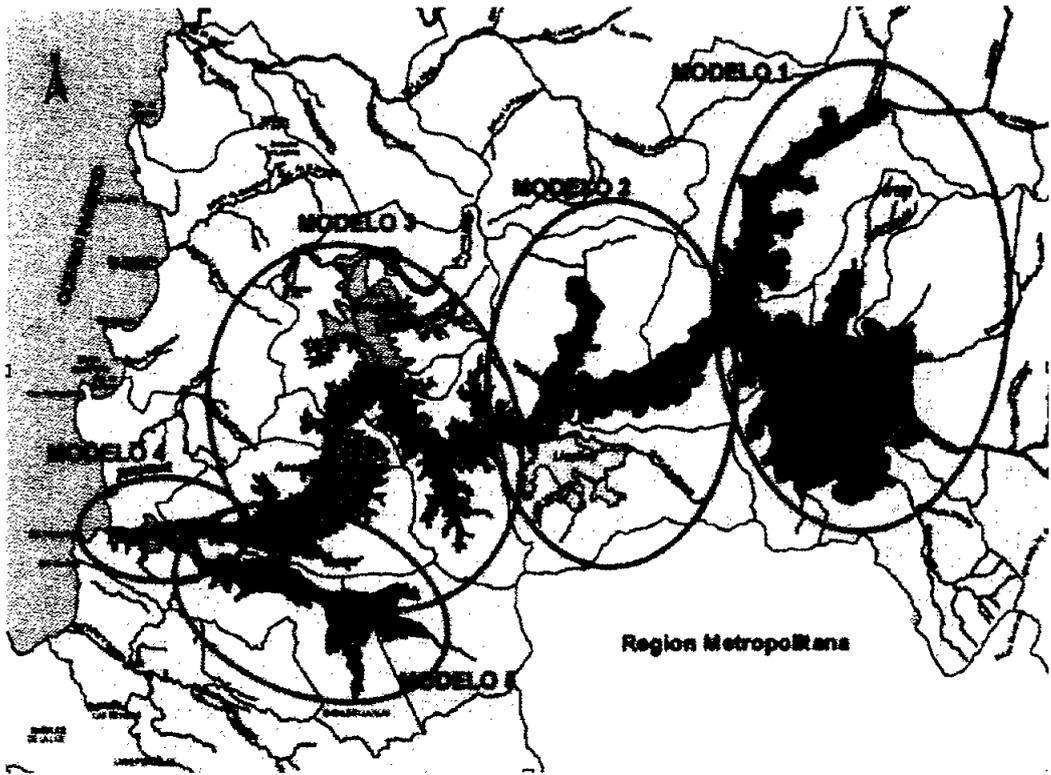


Figura 1: Delimitación de acuífero en el valle del río Aconcagua (complemento, ver figura 2).

El período de simulación comprende los años 1950/1999, incluyendo los datos de hidrología y fluviometría que la Dirección General de Aguas maneja gracias a sus estaciones presentes en la cuenca del río Aconcagua. Se han considerado las estaciones de resguardo Los Patos, San Felipe y Aromos para el control de las variables de precipitación, las cuales son ingresadas como datos de entrada para la aplicación del MOS y el modelo de escorrentía MPL (Modelo Pluvial).

La metodología empleada en la simulación del MOS permite generar el caudal en diversos puntos de interés de la cuenca. Para los sectores de riego se incluyen procesos como el reúso de derrames de riego, lo que se traduce en una mayor eficiencia a nivel de sector.

Las percolaciones obtenidas desde los sectores de riego, canales y tramos de río constituyen recargas al sistema subterráneo y conforman la integración de los modelos hidrogeológicos con los resultados del MOS.

La modelación hidrogeológica de la cuenca del río Aconcagua se efectúa mediante la utilización del software Visual Modflow 2.61. Este programa permite la simulación de un sistema

acuífero resolviendo la ecuación de flujo impermanente restringida a condiciones de borde especificadas por el usuario.

La cuenca del valle del río Aconcagua, particularmente su embalse subterráneo, ha sido dividida en cinco sectores, que corresponden a:

Modelo 1: Valle de Los Andes, San Felipe y Putaendo. Término aguas abajo junta río Aconcagua y río Putaendo.

Modelo 2: Valle del río Aconcagua entre junta Río Aconcagua con río Putaendo hasta Romeral. Incluye los valles de Catemu y Llay Llay. Incluye Dren Las Vegas de ESVAL.

Por razones estratigráficas este modelo se dividió en dos, uno para el valle principal del río Aconcagua y otro para el valle de Llay Llay.

Modelo 3: Valle Aconcagua entre Romeral y Tabolango. Incluye el valle de Los Esteros, Los Litres y Rabuco.

Modelo 4: Valle Aconcagua entre Tabolango y la Costa.

Modelo 5: Valle del estero Limache.

El sistema ha sido representado en base a sus características específicas, a partir de cinco modelos (Figura 2):

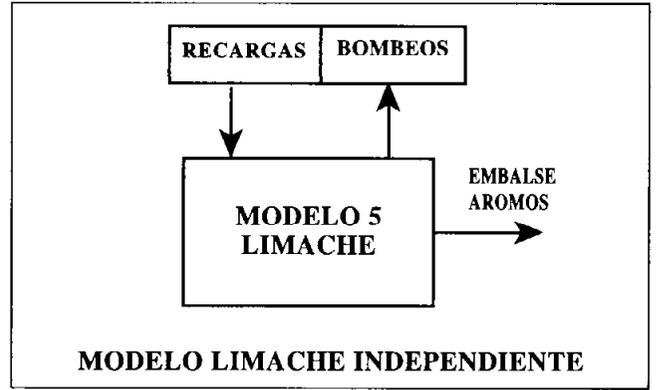
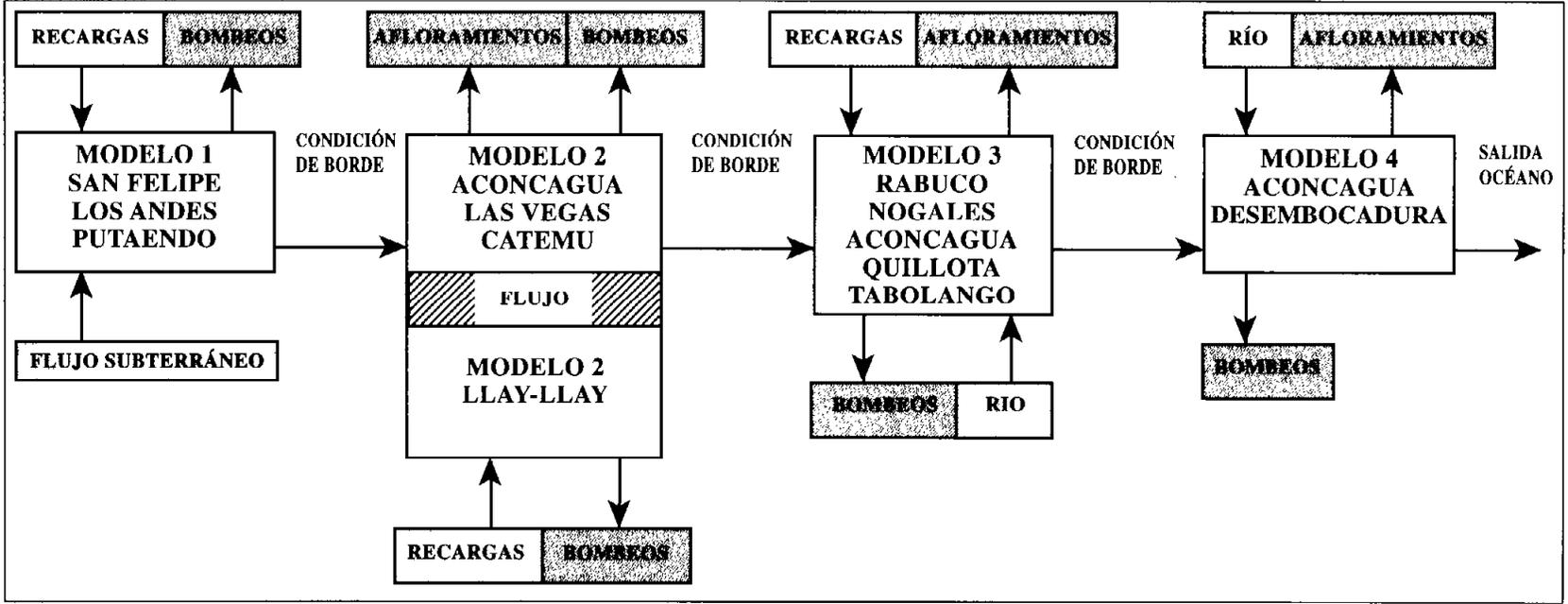


Figura 2: Adaptado de Ingendesa, 1998.

5.2.2 Criterios para evaluar la disponibilidad

Para efectuar la evaluación de disponibilidad de recursos subterráneos a partir de la modelación hidrogeológica, se han manejado diferentes criterios dentro de la cuenca. Estos criterios están relacionados directamente al manejo de las recargas, las cuales son obtenidas mediante la incorporación de un caudal efectivo de explotación (Caudal Nominal x Factor de Uso) en el MOS, y las condiciones de borde del sistema. Por otro lado, ha sido necesario replantear la definición del río Aconcagua en algunas secciones de la cuenca.

La política de la DGA en relación con la explotación de las aguas subterráneas compatibiliza las exigencias legales con las características físicas de dicho recurso y toma en consideración las necesidades y los intereses superiores de la Nación. De acuerdo a lo anterior, la acción de la DGA propende a una explotación sustentable del recurso, que no genere menoscabo al derecho de terceros y que no limite innecesariamente su aprovechamiento, considerando su enorme importancia para el interés nacional.

En general, un acuífero, desde el punto de vista de sus recursos hídricos, se puede caracterizar por un volumen almacenado de agua y una recarga renovable en el tiempo. Un acuífero es simultáneamente un almacenamiento de agua y vía de transporte de la misma. Las reservas de él están constituidas por el volumen de agua que almacena, determinado por el nivel de saturación del terreno. El caudal medio que recorre el acuífero y sale del mismo, procedente de la alimentación externa que recibe, es conocida como la recarga media anual.

En relación con la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, es importante destacar que la Dirección General de Aguas, en general, para constituir nuevos derechos, hace un balance considerando el caudal de explotación sustentable del acuífero y los aprovechamientos y usos comprometidos, ya que es obligación del Servicio evitar la sobreexplotación de los acuíferos tanto por razones de sustentabilidad en el largo plazo de los aprovechamientos (el derecho de aprovechamiento es a perpetuidad), como por la necesidad de resguardar los derechos de los usuarios existentes.

En este sentido es importante destacar que los problemas relacionados con las aguas subterráneas tanto en cantidad como en calidad, en general se perciben con mucho retraso respecto del momento en que se inician, como consecuencia de la lenta dinámica de esta agua (muy bajas velocidades de flujo); por el mismo motivo son también muy lentos los efectos de las

medidas que se pueden adoptar para resolverlos. Por ello, la gestión de los recursos hídricos subterráneos, para que sea eficaz, se basa en políticas de prevención que permitan actuar sobre las causas que pueden originar tales problemas.

Recarga

Las recargas provenientes del MOS han sido validadas y calibradas. El valor de estas fluctúa en el valle en rangos de 0,8 a 9 m³/s.

Condiciones de borde

El comportamiento y las interacciones entre cada uno de los modelos han sido representados mediante sus condiciones de borde.

Para los modelos 1 y 2, los cuales deben ser operados en forma conjunta debido a que los flujos pasantes desde el primero al segundo constituyen una recarga horizontal considerable, se ha evaluado un flujo promedio pasante de 10,3[m³/s]. Por otro lado, desde el sector de Llay Llay se ha evaluado un flujo subterráneo saliente hacia el valle principal promedio de 3.80l/s. Para los modelos 2 y 3 existe independencia debido a la discontinuidad que produce el Dren Las Vegas, ubicado entre ambas secciones. Para el modelo 3 y 4 se han evaluado flujos pasantes entre 45-65[l/s] desde el primero hacia el segundo respectivamente. Con relación al modelo 5, el que representa el valle de Limache, no existen flujos pasantes a otra sección debido a la discontinuidad hidrogeológica que produce el embalse Aromos.

Explotación del caudal sustentable

Como criterio general, la Dirección General de Aguas considera el caudal de explotación sustentable como el recurso disponible a nivel de la fuente para determinar los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas susceptibles de otorgarse en carácter de permanentes y definitivos.

Para los efectos de determinar los derechos disponibles de aguas subterráneas susceptible de ser otorgados a nivel de acuífero, el criterio técnico establecido por la DGA indica el siguiente procedimiento:

1. Determinación del caudal de explotación sustentable a nivel de acuífero (oferta de agua subterránea),
2. Determinación de los derechos y usos susceptibles de ser regularizados, a respetar en el acuífero;
3. Determinación del porcentaje de uso efectivo de los derechos y usos a respetar, por tipo

- de actividad, definiendo así la demanda real sobre el acuífero; y finalmente,
4. Establecer el balance entre la demanda real y la oferta de recurso subterráneo en el acuífero.

Factores de uso

El factor de uso refleja la naturaleza de la explotación de aguas subterráneas, que hace que las captaciones sean empleadas solo en forma temporal, y de ese modo, la extracción media de largo plazo desde el acuífero sea sustancialmente menor que la explotación máxima autorizada como derecho de aprovechamiento.

En efecto, para una actividad cualquiera, como por ejemplo la actividad agrícola, los pozos se utilizan algunos meses en el año y difícilmente se explotan por más de 8 horas diarias, debido a los requerimientos hídricos del cultivo o plantación; inclusive, en algunos casos las aguas subterráneas se emplean como complemento de recursos superficiales solamente en períodos de déficit y como suplemento al riego superficial. Este mismo análisis puede hacerse a cualquier otra actividad económica que utilice agua entre sus procesos productivos, incluyendo el uso doméstico, el cual presenta demandas variables a lo largo del año.

El factor de uso permite determinar en forma real el nivel de extracción del agua y comparar directamente este caudal con el caudal sustentable de explotar en el largo plazo. Estos criterios han estado históricamente presentes en el análisis de esta materia. Es así como durante los últimos 30 años ha sido posible el desarrollo de importantes acuíferos que de otro modo habrían debido cerrarse en esa época para nuevas explotaciones. En este caso se encuentran acuíferos de la importancia de los de Copiapó, Mapocho Alto, Santiago, Colina, Casablanca y muchos otros.

Cualquier otro criterio sería funesto para el desarrollo futuro del país, puesto que si se consideraran solo los derechos nominales y no la demanda real sobre el acuífero en la evaluación de la disponibilidad, no sería posible en la actualidad constituir ningún nuevo derecho de agua subterránea en la mayoría de los acuíferos del territorio nacional, con la consecuente y absurda conclusión de que debido al monto de los derechos constituidos, no existe disponibilidad del recurso para resolver nuevas peticiones sobre esas aguas, cerrando de esta manera cualquier posibilidad de desarrollo de alguna actividad económica que deba recurrir al agua subterránea, ya sea porque se necesita de un caudal constante para alimentar sus sofisticados sistemas de riego o porque simplemente no existe disponibilidad en los cauces superficiales cercanos.

Para este estudio se utilizaron los siguientes factores de uso:

Tipo de uso	factor
Agua potable	0.75
Riego	0.20
Suplemento al riego	0.10
Industrial	0.30
Minero	0.75

Los factores antes enunciados han sido determinados considerando la información recolectada de encuestas a usuarios a través de catastros, registros de extracción, información de la SISS y de diversos estudios realizados sobre la materia.

5.3 OPERACIÓN Y RESULTADOS

5.3.1. Operación modelos

El Modelo Operacional del Sistema (MOS) ha sido operado en condiciones futuras con la infraestructura de riego actual (año 2000). Los archivos de resultados del MOS relacionados a las recargas medias mensuales de: Precipitación, Pérdidas desde canales y esteros, y Percolación de Riego, desde cada uno de los sectores son ingresados al modelo hidrogeológico.

Los modelos hidrogeológicos fueron operados de la siguiente forma:

Modelo 1: Consideró una explotación de 2,2[m³/s] desde captaciones tipo pozo y noria. Los flujos salientes desde este modelo representan una recarga horizontal hacia el modelo 2.

Modelo 2: No incluye el submodelo Llay Llay. Consideró 5 escenarios de simulación con niveles de explotación que fluctuaron entre 526 l/s hasta los 998 l/s, debido a las exigencias y soporte del sistema.

Modelo Llay Llay: Consideró una explotación efectiva de 825[l/s].

Modelo 3: Se corrieron 4 escenarios de simulación con niveles de explotación que fluctuaron entre los 3,7 m³/s hasta los 4,3 m³/s; además se consideró la reubicación de pozos, una redistribución de caudales y algunos cambios en las condiciones de borde.

Modelo 4: Consideró una explotación de diferentes valores iniciales 900[l/s], 500[l/s] y 440[l/s].

Modelo 5: Consideró una explotación de diferentes valores iniciales 930[l/s], 870[l/s], 770[l/s], 735[l/s] y 700[l/s].

5.3.2. Resultados modelos

Se podrían extender muchas páginas mostrando los resultados tabulares y gráficos de cada uno de los escenarios simulados, pero como ese no es el objetivo de este tema, se presentarán tan solo algunos de los resultados posibles de obtener con los modelos para posteriormente presentar la oferta sustentable que el valle en su totalidad y sectorizado es posible de entregar.

De acuerdo a esta figura las recargas en el modelo 1 alcanzan un valor de $9,12\text{m}^3/\text{s}$. Por condiciones de nivel constante entran al sistema $3,11\text{m}^3/\text{s}$, de los cuales un 78% proviene de la zona 2 de balance (valle de San Felipe- Los Andes). El aporte del almacenamiento representa un 12% del total de las entradas.

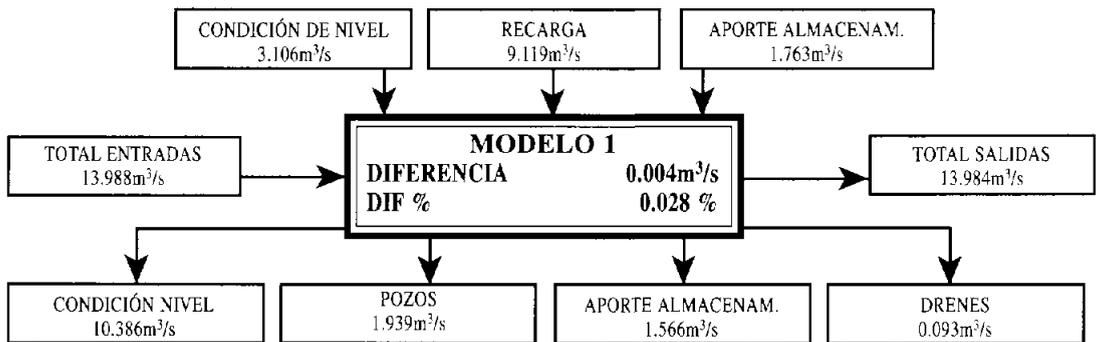
El caudal subterráneo pasante hacia el modelo 2 alcanza a $10,4\text{m}^3/\text{s}$; además del balance glo-

bal, se puede observar que la recarga y los flujos de entrada al sistema totalizan alrededor de $12,2\text{m}^3/\text{s}$, los cuales sustentan el bombeo establecido manteniendo un flujo subterráneo pasante en el rango histórico de dichos valores.

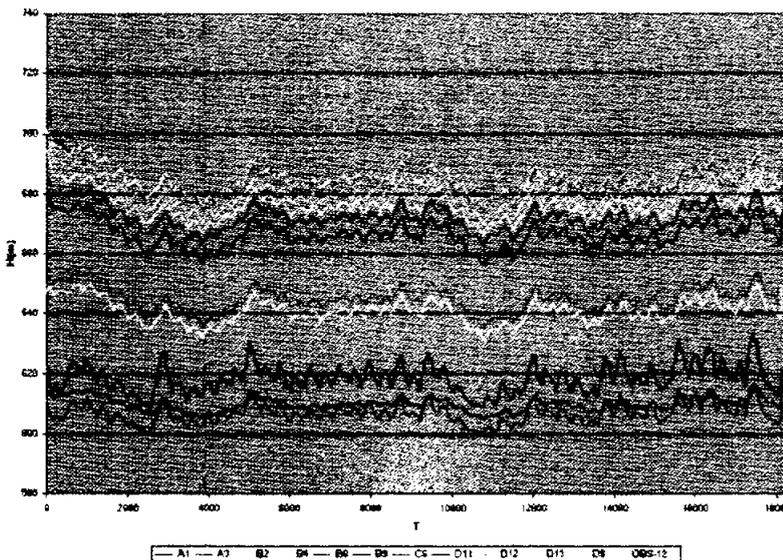
Con respecto a las salidas, las extracciones promedios para el período de simulación corresponden a $1,94\text{m}^3/\text{s}$ correspondientes a un 13% del total de las salidas y a un 14% del total de entradas.

La tendencia general de los niveles simulados en este modelo (Figura 3), muestra que se alcanza la estabilización, respecto al instante inicial. Al observarla es posible advertir que frente a un evento de sequía similar a la ocurrida en 1968 los niveles descenderían aproximadamente 20m en un período de cuatro años; observándose una recuperación posterior sin alcanzar el nivel original.

MODELO 1 LOS ANDES - SAN FELIPE - PUTAENDO



NIVELES MODELO 1 OPERACIONES 50 AÑOS CASO BASE



5.3.3. Caudal sustentable de explotar en el acuífero.

Basado en los resultados entregados por el modelo de simulación para la cuenca del río Aconcagua, y asociando estos caudales efectivos con los factores de uso antes mencionados, se tiene la oferta de caudal nominal sustentable para ser concedido como derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas para cada uno de los sectores estudiados. Cabe señalar que estos resultados corresponden a los caudales modelados para cada sector, y su comparación con la demanda al 31 de diciembre del año 2000. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Sector	Oferta Q Efectivo (L/S)	Oferta Q Nominal (L/S)
San Felipe-Los Andes	1.980	6.612
Putendo	195	511
Aconcagua-Las Vegas	1.906	3.740
Catemu	92	361
Llay-Llay	825	3.886
Rabuco	6	47
Nogales	998	1.862
Aconcagua-Quillota	2.996	12.384
Aconcagua-desembocadura	477	2197
Limache	770	3.179
Total	10.245	34.779

En una segunda etapa, estos caudales son comparados con las demandas de aguas subterráneas que el Departamento de Administración de los Recursos Hídricos, DARH, maneja. Solo así se puede cuantificar cuál es el caudal que se debe constituir y cuáles son los derechos que quedarán insatisfechos. Asimismo, se puede reconocer si existe la posibilidad de permitir derechos provisionales, dependiendo por supuesto

que se hayan satisfecho todos los derechos permanentes y que aun así exista disponibilidad en el acuífero.

6. CONCLUSIONES

La simulación de la respuesta del acuífero del valle del río Aconcagua ha requerido la reformulación de las bases de cálculo de los modelos originalmente desarrollados de modo de operar según los criterios de recarga media que se aplican para la evaluación de disponibilidad de aguas subterráneas.

Los modelos de simulación son poderosas herramientas de apoyo para la toma de decisiones y manejo de los recursos hídricos, como se ha podido ver en este trabajo.

Permiten tener una visión de corto y largo plazo frente a las distintas situaciones que se presenten en una cuenca.

La flexibilidad de operación de los modelos permiten ir actualizando el desarrollo y evolución que presenta una cuenca a través del tiempo, como también la información de la base de datos.

Los resultados obtenidos con un modelo de simulación permiten determinar con mayor precisión, y sobre una base de estudios geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, etc., cuáles son los caudales sustentables que el sistema permite y es capaz de soportar, permitiendo tomar decisiones mucho más valederas y que no perjudique el derecho de terceros.

Por último, un punto que nunca se debe olvidar, es la importancia de los antecedentes e información de entrada de los modelos. Estos controlan la calidad de los resultados. Por eso, datos de entrada correctos y un modelo conceptual coherente, entregarán resultados confiables y representativos de la realidad.

CUIDADO: datos de entrada poco fiables y variables pueden producir resultados engañosos.