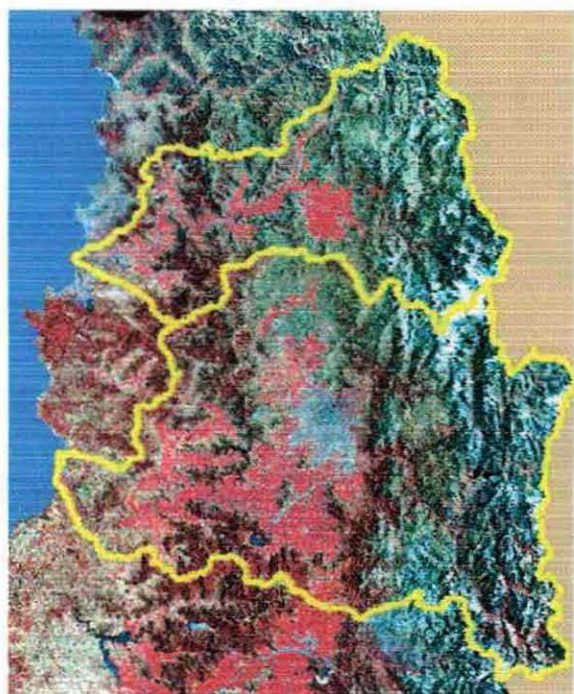




COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO SECRETARIA EJECUTIVA

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS ACOPLADOS A SIG PARA EL MANEJO Y PLANIFICACIÓN EN LAS CUENCAS DE ACONCAGUA Y MAIPO



INFORME FINAL

Presentado por:
**CENTRO DE ESTUDIOS EN
PERCEPCIÓN REMOTA Y SIG Ltda.**



Diciembre 2004

Proyecto

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS ACOPLADOS A SIG PARA EL MANEJO Y PLANIFICACIÓN EN LAS CUENCAS DE ACONCAGUA Y MAIPO

INFORME FINAL

Equipo de Trabajo:

a) Contraparte Técnica:

CNR: Juan Pablo Shuster
Gastón Sagredo

DGA: Ana María Gangas
Mauricio Zambrano
Verónica Pozo

b) CPR&SIG Ltda.

Carlos Pattillo
Eduardo Varas
Pablo Isensee
Ricardo Gonzales
Maria Elena Pezoa

Diciembre 2004

Proyecto

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS ACOPLADOS A SIG PARA EL MANEJO Y PLANIFICACIÓN EN LAS CUENCAS DE ACONCAGUA Y MAIPO

INFORME FINAL

Equipo de Trabajo:

a) Contraparte Técnica:

CNR: Juan Pablo Schuster
Gastón Sagredo

DGA: Ana María Gangas
Mauricio Zambrano
Verónica Pozo

b) CPR&SIG Ltda.

Carlos Pattillo
Eduardo Varas
Pablo Isensee
Ricardo Gonzalez
Maria Elena Pezoa

Diciembre 2004

INDICE

1.- ANTECEDENTES.....	4
1.1.- OBJETIVOS	4
1.1.1.- Objetivo General.....	4
1.1.2.- Objetivos Específicos	4
1.2.- ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL ESTUDIO	5
2.- MODELOS HIDROLOGICOS Y SIG	6
2.1.- Introducción.....	6
2.1.1.- Aspectos Generales	6
2.1.2.- Sistemas de Información Geográficos	7
2.1.3.- Modelos Hidrológicos	9
2.1.4.- Modelos de sistemas de recursos de agua.....	11
2.2.- Modelos Hidrológicos de Manejo y Planificación de Cuencas	16
2.2.1.- ARSP	16
2.2.2.- MODSIM.....	19
2.2.3.- REALM	20
2.2.4.- RiverWare.....	22
2.2.5.- AQUARIUS.....	24
2.2.6.- SARH-2000.....	24
2.2.6.1.- Contribución de Sarh-2000.....	24
2.2.6.2.- Metodología de Búsqueda de mejores alternativas de operación.....	27
2.2.7.- Algunos estudios realizados en Chile.....	31
2.3.- Modelos Hidrológicos acoplados a Sistemas de Información Geográficos (SIG)	32
2.3.1.- WEAP21.....	32
2.3.2.- MIKE BASIN	34
2.3.3.- MIKE INFO	36
2.3.4.- WaterWare.....	37
2.3.5.- BASINS	39
2.3.6.- Reflexiones sobre los modelos revisados	44
2.4.- El Modelo MAGIC y el modelo MPL.....	44
2.4.1 El Modelo MAGIC.....	45
2.4.1.1.- Tablas descriptivas de los Datos de Entrada del Modelo Magic	53
2.4.1.2.- Simulación del Sistema en el Modelo Magic	54
2.4.1.3.- Tablas descriptivas de los Resultados del Modelo Magic	55
2.4.2.- Modelo MPL	57
2.4.2.1 Base conceptual del modelo MPL.....	58
2.4.2.2.- Datos de Entrada al Modelo	63
2.4.2.3.- Metodología de Aplicación.....	64
2.4.2.4.- Resultados del modelo MPL.	65
2.5.- Cartografía Digital e información base.....	65
3.- DISEÑO Y PROGRAMACION DE LA INTERFAZ	69
3.1.- Requerimientos y Consideraciones Iniciales.....	69
3.2.- Adaptación del SIG a los requerimientos de la estructura de datos de entrada y salida.	71
3.3.- Descripción conceptual de la interfaz SIG para el sistema MAGIC.....	72
3.4.- Diseño Lógico de la Interfaz	73

3.5.- Programación.....	77
3.5.1.- Modulo De Preparación De Datos	77
3.5.2.- Modulo De Modelación.....	84
3.5.3.- Modulo De Análisis De Resultados.....	86
4.- Aplicación de la Interfaz a las Cuencas de Aconcagua y Maipo.....	87
4.1 Preparación de la Información General.....	87
4.2 Creación del Diagrama de Modelación.	87
4.3 Análisis de Resultados.....	89
ANEXO 1: Descripción de Tablas de Entrada del Modelo MAGIC.....	90
ANEXO 2: Descripción de Tablas de Salida del Modelo MAGIC.....	131
ANEXO 3: Metodología de Construcción del Modelo Digital de Elevación.....	173
ANEXO 4: Descripción de Conceptos y Procedimientos para la caracterización de Áreas de Riego y Pluviometría media.....	181
BIBLIOGRAFIA.....	185

El presente documento corresponde al Informe Final del proyecto “Estudio e Implementación de Modelos Hidrológicos Acoplados a Sig Para El Manejo y Planificación En Las Cuencas De Aconcagua y Maipo”.

El informe se divide en cuatro capítulos, el primero, denominado antecedentes, menciona los objetivos y etapas del estudio, el segundo capítulo contiene el marco conceptual sobre SIG y Modelos Hidrológicos y la descripción de sistemas existentes, el tercer capítulo trata sobre el desarrollo y funcionalidades de la interfaz programada y el cuarto y último capítulo, trata sobre la aplicación de la interfaz a la modelación de las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo.

1.- ANTECEDENTES

En este proyecto se plantearon los siguientes objetivos y etapas de trabajo.

1.1.- OBJETIVOS

1.1.1.- Objetivo General

El objetivo general de este proyecto es la construcción de una aplicación SIG para el modelo de simulación denominado MAGIC. (Modelación Analítica Genérica Integrada de Cuencas), desarrollado por la DGA, para ser aplicada en las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo, utilizando la plataforma de información del SIIR de la CNR y las modelaciones ya realizadas por la DGA. Esta aplicación SIG debe permitir definir la topología del Sistema de Recursos Hídricos que se quiere modelar, el ingreso de los datos de entrada requeridos y la visualización de los resultados de la simulación para los diferentes elementos integrantes del sistema modelado.

1.1.2.- Objetivos Específicos

- a) Lograr una representación espacial real del sistema que se quiere modelar en la cual la creación lógica de los elementos comprendidos en la modelación queden determinados por la configuración física de la cuenca, esto es, área, sectores de riego, embalses superficiales, acuíferos, nodos, tramos de río y tramos de canal.
- b) Permitir el despliegue en ambiente SIG tanto de la información de entrada como de los resultados de tal manera que sea posible apreciar visualmente la variación espacial y la respuesta del sistema modelado en un intervalo de tiempo.
- c) Disponer de una herramienta moderna, amigable e interactiva para la operación, evaluación y por ende, de administración integral de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca, donde el manejo de datos (entrada o actualización de ellos) sea compatible además, con el Sistema Integrado de la Gestión del Recurso Hídrico - SIGIRH, sistema usado actualmente por la Dirección General de Aguas y con el SIIR de la Comisión Nacional de Riego.

1.2.- ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL ESTUDIO

El estudio se dividió en tres etapas, con las siguientes actividades y duración en cada una de ellas

Etapas 1. Recopilación y Análisis de antecedentes (1mes)

- a) Recopilación Bibliográfica
- b) Análisis del Programa MAGIC
- c) Recopilación Cartografía Base y Temática

Etapas 2. Diseño Lógico y Programación de la Aplicación (4 1/2 meses)

- a) Diseño Conceptual de la Interfaz
- b) Desarrollo de la Interfaz
- c) Preparación de la cartografía

Etapas 3. Implementación del Modelo MAGIC, utilizando la interfaz desarrollada en las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo e informe final. (2 meses)

- a) Implementación de MAGIC en los Ríos Aconcagua y Maipo
- b) Capacitación
- c) Marcha Blanca
- d) Informe final

La duración total del proyecto fue de 6 meses, existiendo un pequeño traslape entre el inicio y término de las etapas.

La estructura de este informe final divide las etapas del proyecto en capítulos estructurados de manera tal de ir guiando al lector en forma ordenada en las diferentes actividades realizadas, refiriéndolo a anexos específicos cuando sea necesario profundizar en detalles relativos a cada tema.

2.- MODELOS HIDROLOGICOS Y SIG

Este capítulo del informe contiene la recopilación de antecedentes sobre desarrollos SIG y Modelos Hidrológicos, el Análisis del Modelo MAGIC y MPL.

2.1.- Introducción

2.1.1.- Aspectos Generales

A comienzos de la década de los 60, gracias a la aparición de los computadores, comienzan a generarse modelos numéricos que permiten simular los procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica con el objetivo de ayudar en el manejo y planificación de ella. Estos modelos pueden clasificarse en modelos hidrológicos y modelos de sistemas de recursos de agua (Baldwin et al., 2002).

- Los Modelos hidrológicos, simulan los fenómenos y procesos del ciclo hidrológico. En la planificación y manejo de una cuenca permiten analizar los efectos de cambios en el uso y cobertura del suelo, cambios en la precipitación y alteraciones en el escurrimiento. Nacen en 1962 con el Stanford Watershed Model (SWM) (Crawford y Linsley, 1962), a partir del cual se han desarrollado una serie de modelos tanto agregados, que simulan la cuenca completa como una sola unidad, como distribuidos, que son aquellos que dividen la cuenca en unidades más pequeñas con parámetros independientes.
- Los modelos de manejo y planificación de sistemas de recursos de agua permiten simular el comportamiento de una red de distribución de agua, considerando divisiones, almacenamiento (tanto superficial como subterráneo) y derechos de agua de cuencas. Comienzan a ser desarrollados principalmente a partir de los estudios realizados en la Universidad de Harvard (Maass, et al., 1962). Esta Universidad formuló el llamado Harvard Water Program, financiado con aportes de diferentes instituciones estatales y privadas, el cual abordó diferentes estudios e investigaciones sistemáticas en metodologías de diseño de sistemas de recursos de agua. Surgieron así los primeros estudios que utilizan computadores digitales para analizar las consecuencias tanto físicas como económicas de una alternativa de diseño para un sistema hídrico.

A medida que ha aumentado la capacidad de los computadores, ambos tipos de modelos han ampliado su aplicación, incorporando otro tipo de procesos como el transporte de contaminantes, erosión y transporte de sedimentos, simulación de sistemas complejos, optimización económica y otros.

2.1.2.- Sistemas de Información Geográficos

Un sistema de información geográfico (SIG) es un sistema computarizado, consistente en la colección organizada de equipos, programas, datos georeferenciados y usuarios. Estos recursos trabajan en conjunto para el almacenamiento, análisis y despliegue de información espacial asociada a una base de datos de atributos. (Chuvieco, 1996).

En el año 1962, en Canadá, se diseñó el primer sistema formal de información geográfica para el mundo de recursos naturales a escala mundial. Durante las décadas de los años sesenta y setenta se empezó a aplicar la tecnología del computador digital al desarrollo de información automatizada.

Excluyendo cambios estructurales en el manejo de la información, la mayoría de programas estuvieron dirigidos hacia la automatización del trabajo cartográfico y pocos exploraron nuevos métodos para el manejo de información espacial. Se siguieron básicamente dos tendencias:

- La producción automática de dibujos con un alto nivel de calidad pictórica (CAD), y
- La producción de información basada en el análisis espacial, pero con baja calidad gráfica (SIG en formato RASTER).

La producción automática de dibujo se basó en la tecnología de diseño asistido por computador o CAD (Computer Aided Design). Este se utilizó en la cartografía para aumentar la productividad en la generación y actualización de mapas. Los CAD manejan la información espacial como dibujos electrónicos compuestos por entidades gráficas organizadas en planos de visualización o capas. Cada capa contiene la información de los puntos en la pantalla o píxeles. Estos conjuntos de puntos organizados por planos de visualización se guardan en un formato vectorial. El desarrollo de la tecnología CAD se aplicó para la manipulación de mapas y dibujos y para la optimización del manejo gerencial de información cartográfica, desarrollándose la tecnología AM/FM (Automated Mapping / Facilities Management).

Este desarrollo gráfico, a cuyos elementos espaciales se les agregó un sistema de referencia conocido y ligado a la Tierra (georreferencia), se enlazó de manera permanente y transparente al usuario, con el manejo de bases de datos, donde se guardan las características que describen a cada elemento espacial, dando origen a una nueva herramienta computacional conocida como "Sistemas de Información Geográfico" o SIG.

A inicio de los años ochenta, se produjo una expansión del uso de los SIG, facilitado por la generalización del uso de microcomputadores y estaciones de trabajo, la aparición y consolidación de las bases de datos relacionales (INFO, INGRES, ORACLE) y las primeras modelaciones explícitas de las relaciones espaciales o topología. En este sentido la aparición de productos como ArcInfo y PAMAP en el ámbito del SIG, fue determinante para lanzar un nuevo mercado con una rapidísima expansión.

La aparición del Diseño Orientado a Objetos (OOD) en los SIG, permite nuevas concepciones donde se integra todo lo referido a cada entidad: la simbología, geometría, topología y atributos. Pronto los SIG se comienzan a utilizar en cualquier disciplina que necesite la combinación de planos cartográficos y bases de datos. Aparecen aplicaciones en Ingeniería Civil, tales como, diseño de carreteras, presas y embalses; estudios medioambientales; estudios socioeconómicos y demográficos; planificación de líneas de comunicación; ordenación del territorio; estudios geológicos y geofísicos; prospección y explotación de minas, entre otros.

Los años noventa se caracterizan por la madurez en el uso de estas herramientas en los ámbitos tradicionales mencionados y por su expansión a nuevos campos, como en los negocios, propiciada por la generalización en el uso de los computadores personales de gran potencia. La enorme expansión de las comunicaciones y en especial de Internet, la aparición de los sistemas distribuidos y la fuerte tendencia a la unificación de formatos de intercambio de datos geográficos propician la aparición de una oferta proveedora, que suministra datos a un enorme mercado de usuario final.

El incremento de la popularidad de las tendencias de programación distribuida y la expansión y beneficios de la máquina virtual de Java, permiten la creación de nuevas formas de programación, de esta manera aparecen los agentes móviles que tratan de solucionar el tráfico excesivo que hoy en día se encuentra en Internet. Los agentes móviles utilizan la invocación de métodos remotos y la serialización de objetos de Java para lograr transportar la computación y los datos. Nace aquí un nuevo paradigma para el acceso a consultas y recopilación de datos en los SIG, cuyos mayores beneficios se esperan en el futuro.

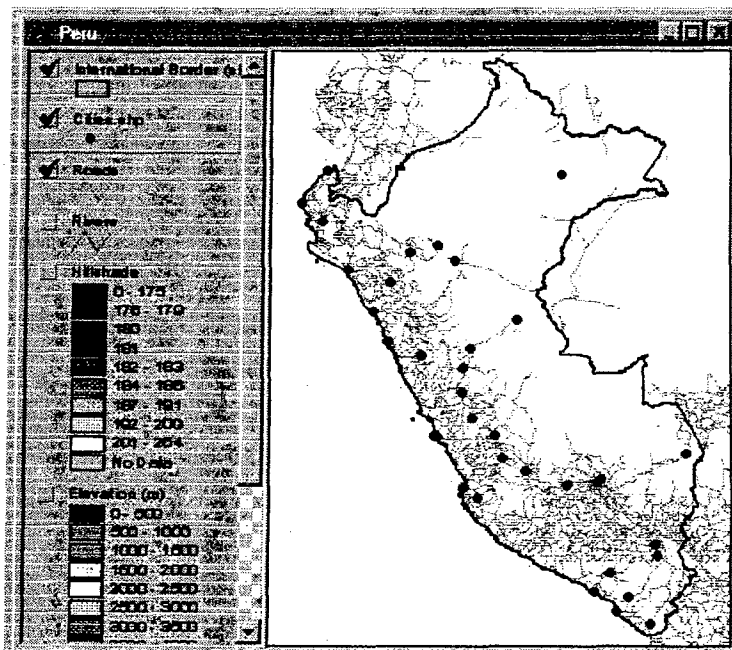


Figura 2.1.1. SIG del Perú donde se engloba información de Ciudades, ríos, caminos y elevaciones, todo enlazado en una vista

Los datos geográficos debidamente organizados, procesados y analizados proporcionan una base consistente para la toma de decisiones respecto de la gestión y ordenamiento ambiental, la planificación de los recursos de la tierra, y para el monitoreo y conservación de los recursos renovables y no renovables. Más aun, las organizaciones relacionadas con estas actividades están obligadas a crear planes teniendo en cuenta una amplia gama de factores tales como conflictos en el uso potencial del suelo, medidas de protección del medio ambiente, evaluación de impactos ambientales y sus implicaciones económicas en el país. Los SIG, por el hecho de combinar tanto datos gráficos como atributos o propiedades, son una de las pocas tecnologías que hoy en día integran en forma conjunta disciplinas de diferentes ciencias, abarcando un amplio rango de aplicaciones.

2.1.3.- Modelos Hidrológicos

La modelación del proceso lluvia-escorrentía de una cuenca convierte la precipitación en escorrentía. Estos modelos son útiles para la determinación de los caudales de diseño de diversas obras hidráulicas. La entrada a estos modelos está constituida por la precipitación efectiva, es decir, la lluvia caída menos las pérdidas producidas debidas a infiltración, evaporación y otros procesos. Los fenómenos hidrológicos, cambian en las tres dimensiones espaciales y en el tiempo, pero el considerar toda esa variación puede hacer que el modelo sea muy complicado para aplicaciones prácticas. Por ello surgen diferentes tipos de modelos hidrológicos, desde los modelos agregados, donde el sistema es promediado en el espacio, hasta los modelos distribuidos, que consideran los procesos hidrológicos como variables distribuidas espacialmente y son por tanto más precisos, aunque más complicados de desarrollar. En este último tipo de modelos, los SIG son una buena herramienta para modelar la cuenca con un buen nivel de resolución.

Para el caso específico de la Hidrología, se pueden realizar estudios y proyecciones del aprovechamiento del recurso hídrico involucrando en las cuencas hidrológicas todos aquellos elementos que las integran, como la red fluvial y pluvial, los acuíferos y cuerpos de agua, las áreas de recarga, y otras fundamentales para establecer un proyecto de desarrollo sustentable basado en el recurso agua. Una mala planificación y utilización de los recursos, origina serios problemas al medio ambiente y repercute en las condiciones de vida humana, tal es el caso de sequías y abastecimiento insuficiente a las zonas urbanas.

En la actualidad son indispensables los estudios para analizar el impacto y consecuencias del uso del recurso, basándose en factores de contaminación ambiental del suelo y agua, pérdida de zonas naturales de recarga de agua del suelo, zonas de inundación o zonas no aptas para el desarrollo urbano y otros para dar con soluciones adecuadas antes del agotamiento del recurso. Los sistemas geográficos de información son una herramienta básica para ello.

Los estudios hidrológicos existentes que emplean SIG van desde el simple procesamiento de datos y estimación de parámetros para validar modelos hidrológicos distribuidos, usando los SIG como una herramienta de mapeo y visualización, hasta la modelación y el manejo comprehensivos de tormentas hidrológicas en áreas de diverso tipo y tamaño alrededor del mundo (Sui y Maggio, 1999). El desarrollo continuo del software SIG permite programar las funciones y aplicaciones requeridas en Visual Basic, lo que representa una mayor versatilidad para la modelación hidrológica íntegramente dentro del software SIG. (ArcView 8.x de ESRI).

Desarrollar un modelo hidrológico utilizando SIG, se justifica por las características fundamentalmente espaciales de la información empleada y a la gran capacidad de estos sistemas para almacenar, manejar y visualizar los datos y los resultados. Realizar este tipo de modelos en SIG supone contar con un modelo digital de elevación (DEM) de la zona de la cuenca, conocer las características físicas del terreno y la distribución espacial y temporal de la precipitación caída en la cuenca.

Los avances en informática han permitido el desarrollo de los SIG y de modelos hidrológicos más poderosos y completos. Actualmente, se cuenta con SIG que poseen funciones específicas que facilitan el desarrollo de modelación hidrológica (MH) y por otra parte, se dispone de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos basados en dividir el área de estudio en pequeñas subáreas homogéneas, lo que permite acercarse más al concepto de variación espacial. El uso de los SIG aplicados a la MH en general, brinda beneficios en la modelación y simulación de problemas que requieren interpretación y análisis de información espacial (Maestre y Díaz-Granados, 1996).

Por casi dos décadas, durante los años sesenta y setenta, los SIG y la MH se desarrollaron en paralelo y con poca interacción y sólo hay esfuerzos de integración a fines de los ochenta. En este tiempo surgen esfuerzos de la comunidad SIG por mejorar las capacidades analíticas y una nueva demanda de los hidrólogos por representaciones digitales del terreno. Varias técnicas de MH han permitido a los usuarios de SIG ir más allá del inventario de datos y del manejo de estados. En los años noventa la comunidad hidrológica se preocupó de desarrollar pre-procesadores de los datos de entrada, post-procesadores de resultados y modelos digitales de elevación (DEMs) (Chiang et al., 1992), que proporcionan nuevas plataformas para manejo y visualización de datos (Bian et al., HydroSIG'96). Se han construido modelos hidrológicos distribuidos con data SIG raster, resueltos usando métodos de diferencias finitas o elementos finitos. En los modelos agregados o semi-distribuidos, los SIG son pre-procesadores que convierten los datos de la estructura del SIG a la estructura del modelo. En 1998, el Centro de Investigación en Recursos Hídricos de la Universidad de Texas crea el CRWR-PrePro, un pre-procesador en ArcView que extrae información de datos espaciales digitales y la dispone para ser usada por software hidrológico (Olivera y Maidment, 1999a; Olivera et al., 1998). Asimismo, existen en este centro una serie de trabajos que aprovechan las bondades de los SIG en beneficio de la modelación hidrológica (Maidment, 1996; Maidment et al., 1997; Olivera et al., 2000; Olivera y Maidment, 1999b).

En la última década, aumentó la disponibilidad de datos espaciales que soportan la modelación hidrológica. La distribución gratuita o a bajo costo de datos por Internet y CD-ROM principalmente en Norteamérica sobre elevación del terreno, suelos, uso actual de la tierra, clima y otros (EROS, 2000) estimula el desarrollo de procedimientos para manejo de datos y para elaborar sistemas integrados donde los modelos hidrológicos existentes se conectan a bases de datos espaciales residentes en SIG.

El nivel alcanzado en América Latina no es el mismo, ya que se dispone de menos información. Mientras en Estados Unidos se cuenta con modelos de elevación digital (DEMs) con resolución de 1" a 3" (~30-100 m) y en Reino Unido con celdas de 50 m de lado, para el resto del mundo se tienen DEMs con resoluciones de 1" a 30" (~100-1000 m) (Olivera, 1996; EROS, 2000; ESRI, 2001) y a partir del año 2003, se encuentra disponible en Internet los DEM confeccionados por el proyecto SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de la NASA y distribuidos por el USGS (United States Geological Survey).

Algo similar sucede con la información hidrometeorológica necesaria, la cual es escasa y con frecuencia mal manejada. Consecuentemente, la interacción entre los Modelos Hidrológicos y SIG se usa poco en América Latina, empleándose sólo en proyectos específicos, donde los datos requeridos se obtiene sólo para el área de interés, aún a costos altos.

2.1.4.- Modelos de sistemas de recursos de agua

El manejo integral de cuencas ha sido objeto de estudio desde los años 1960, época en que se comienzan a desarrollar y aplicar técnicas analíticas que permiten considerar en su conjunto a la totalidad de los elementos de un problema y sus interacciones en el propio medio, usando técnicas de ingeniería de sistemas (Hall y Dracup, 1970). Numerosos han sido los enfoques matemáticos y estadísticos utilizados para desarrollar modelos de gestión operativa del recurso agua. En 1960 se crea una rama de investigación operativa aplicada a los recursos hidráulicos y se utiliza por primera vez el análisis de sistemas a esta área del conocimiento en un programa de investigaciones llevado a cabo en la Universidad de Harvard (Maass, et al., 1962). Estos estudios dieron lugar a diversos planteamientos matemáticos del problema cuya resolución se afrontó por simulación y por métodos de optimización directa.

En relación con la ingeniería de sistemas, puede definirse un **modelo de simulación** como la representación cuantitativa o cualitativa de un sistema. Un sistema es una colección de entidades que actúan o interactúan juntas hacia el logro de una meta. El modelo, entonces, es un conjunto de suposiciones (hipótesis) que empleamos para poder ganar una comprensión de cómo se comporta el sistema real. Esta representación de la realidad debe incluir las relaciones entre los diversos factores que son de interés para el análisis que se está llevando a cabo.

El análisis de sistemas es una técnica matemática poderosa, que permite, por ejemplo la planificación de políticas de aprovechamiento de una cuenca

para fines de riego, generación de energía, agua potable y recreación. La primera etapa en la elaboración del modelo es la definición del problema, para lo cual deben establecerse los objetivos del proyecto y cuantificarlos, es decir fijar medidas de efectividad, además de dar pesos relativos a cada propósito del aprovechamiento.

Ello requiere recabar toda la información relevante del proyecto (escurrimientos en la cuenca, características geo-hidrológicas de la misma, superficies de cultivo, capacidad de embalses, y canales de riego, características de las turbinas y centrales de generación, capacidad de sistemas de bombeo de aguas subterráneas, características de los acuíferos y otras) es decir, se debe establecer un banco de datos necesario para modelar el sistema y evaluar las alternativas. Debe luego realizarse el análisis de datos, es decir el ordenamiento de la información y la obtención de datos relevantes.

Luego, durante el modelado del sistema, se debe proceder a diseñar diferentes alternativas de aprovechamiento y evaluarlas tomando en cuenta factores técnicos, económicos, sociales y ecológicos. Debe destacarse que no existen reglas o estrategias de gestión universales para el manejo de los recursos hídricos, sin embargo algunas reglas pueden ser extrapolables de sistemas con topologías y propósitos similares. En general, las reglas a incluir se basan en la topología del sistema en estudio y en el análisis de experiencias previas (Lund y Guzman, 1999; Morel- Seytoux 1999; Belaineh et al, 1999; Soncini-Sessa et al, 1991; Diaz , 1997; Mendoza et al, 1998; Lopez Camacho y C. y Varela Sanchez 1983). Luego se realiza en un paso posterior, la síntesis del sistema, es decir, se determinan las medidas de efectividad para las diversas alternativas. Como las medidas de efectividad en un proyecto complejo, difícilmente pueden reducirse a un solo índice, es necesario proceder a la etapa de toma de decisiones, darle una importancia relativa a todas las medidas de efectividad calculadas previamente. (V. Gerez y M. Grijalva 1993).

Una atención muy especial se debe dar a la descripción del sistema, ya que una descripción inadecuada (desconocimiento de la interacción entre sus partes o subsistemas, o ignorar los cambios en el tiempo) puede ocasionar graves problemas con los resultados esperados del modelo de simulación.

En la elaboración de un modelo de simulación también se da importancia a la determinación de las fronteras del sistema. La frontera, separa elementos cuya estructura se desea conocer de aquellos que no se tomarán en cuenta en el estudio. También define qué variables serán analizadas y cuáles consideradas como datos. Una vez fijada la frontera del sistema puede procederse a analizar la estructura del mismo, es decir la relación entre sus partes, estas relaciones pueden ser de espacio, tiempo, jerarquía, propiedades lógicas o de toma de decisiones. La estructura, depende del objetivo del análisis y la representación del sistema, depende del grado de precisión o detalle con que se quiera llevar a cabo el análisis.

Los **modelos de simulación** se clasifican de varias formas, como ser, en función de su causalidad y concepto aleatorio en **Determinísticos puros**, donde las funciones que relacionan las entradas y las salidas que definen el comportamiento del sistema, no tienen en cuenta la ley o distribución de probabilidad; de **Caja negra**, donde la representación de las relaciones entre dos o mas procesos están basadas en observaciones experimentales y esas relaciones se expresan por ecuaciones matemáticas sin significado físico, los modelos **Conceptuales**, donde la representación de las relaciones entre dos o más procesos se basan en ecuaciones que simulan el proceso físico involucrado que puede ser lineal o no lineal y los modelos **Estadístico / Estocásticos**, que son aquellos en los cuales las relaciones entre las variables están gobernadas por leyes de probabilidades, tanto en relación con su magnitud como su secuencia en el tiempo.

Los **Modelos de Optimización Directa** son modelos que optimizan una función objetivo, sujeto a cierto número de restricciones y condiciones de borde. Los más usados en hidrología se basan en Programación Lineal y Programación Dinámica. La optimización directa consiste, en líneas generales, en utilizar un algoritmo que optimice la función objetivo directamente. Está es resuelta de una manera total, para el caso en que la Función Objetivo y la serie de ecuaciones de restricción sean lineales, mediante la Programación Lineal, usando el algoritmo SIMPLEX descrito por Dantzig en la década del 1950/1960 (Gass, 1972). La tesis doctoral de Dracup (1966) es un trabajo pionero en este campo, y en el planteó el problema sobre la gestión del agua durante un período de 30 años en el Valle de San Gabriel en California. La aplicación de la Programación Lineal al problema de la optimización de un sistema de uso conjunto se limita solo a casos sencillos pues en problemas más complicados (de varios embalses superficiales), aumenta considerablemente el número de restricciones. Si además aguas abajo del acuífero bombeado existiese algún embalse, formando parte del sistema, el problema se complica, convirtiéndose en una configuración inadecuada para la Programación Lineal.

Existen problemas típicos que no pueden tratarse por Programación Lineal sino por **Programación Cuadrática** como son, el coste de construcción de un embalse que es función cuadrática de su capacidad, debido a la economía de escala y la configuración del vaso; los costos de bombeo. Maddock (1972) aplica la programación cuadrática, expresando el coste energético en función cuadrática del caudal de bombeo. Cuando el fenómeno de afección acuífero-río es significativo, resulta forzoso el tratamiento del primero como un sistema distribuido, sea cual fuese la función objetivo elegida (Young y Bredehoeft 1972). Para los casos en que dicha Función Objetivo y las restricciones no sean lineales existen métodos parciales de resolución para casos particulares ya sea de maximización o minimización de la Función Objetivo. Cuando el problema planteado no encaja dentro de dichos casos, puede intentarse su solución bien por métodos heurísticos o por programación dinámica.

La **Programación Dinámica (P.D.)** fue desarrollada por (Bellman, 1957) como una forma de optimización de procesos en las que las decisiones de control sobre el mismo deben tomarse secuencialmente ya sea en el espacio o en el tiempo. Es una técnica de optimización secuencial que no exige linealidad, convexidad y continuidad de las funciones que maneja; no requiere la obtención de un funcional de óptimo; sin embargo el crecimiento de las necesidades de recursos de ordenador, crecen geométricamente con la dimensión del proceso, lo que impide su aplicación convencional a procesos de más de 3 dimensiones (Kaufmann, 1967). Existen distintos tipos de programación dinámica: como la discreta, continua, determinística y estocástica. En la estocástica los métodos más utilizados para determinar la regla de operación de un embalse pueden clasificarse en implícitos y explícitos. Los métodos estocásticos implícitos manejan la estocasticidad de los flujos de entrada al embalse por fuera de la metodología usada para determinar la operación del embalse (simulación y optimización), mientras que los métodos explícitos usan la representación estocástica de los flujos de entrada directamente dentro del problema de operación.

Entre los métodos implícitos mas conocidos en recursos hidráulicos se puede mencionar al método de Montecarlo (Underhill y Carr, 1974) y el de la Aversión al Riesgo (Soncini Scessa et al, 1991). El método explícito más usado es el de las cadenas de Markov (Kemeny et al, 1966; Kaufmann, 1967 pp. 408-465). Los flujos de entrada al embalse pueden ser autocorrelacionados pudiendo considerarse los casos cíclicos y no cíclicos.

Muchas veces las condiciones que caracterizan las soluciones óptimas permiten derivar algoritmos adecuados para encontrar dichas soluciones. Sin embargo, esto no es generalmente cierto y, por lo tanto, deben desarrollarse métodos de cálculo apropiados que permitan determinar, eficientemente, las decisiones óptimas para un determinado modelo (Philippi, 1988).

El planeamiento y gestión del uso conjunto óptimo de sistemas de recursos hidráulicos a gran escala, como el caso que se quiere modelar, requiere de esfuerzos de modelación y optimización que superan las técnicas de optimización matemática, debido a la alta dimensionalidad y complejidad de las ecuaciones de interacción entre variables. En casos complejos, la aplicación de procedimientos de optimización analítica posee un alto riesgo, ya que no es posible definir funciones objetivos, las cuales encapsulen todos los objetivos en una sola expresión matemática. Este problema se ha visto superado con la aparición del desarrollo de técnicas en el campo de la ingeniería de sistemas y de la inteligencia artificial capaces de crear complejos modelos de sistemas hídricos y dar solución a problemas no estructurados (Loucks y R.da Costa, 1991; Seeger, 1987).

En el caso de problemas no estructurados, [entendiéndose como tales a aquellos en el cual intervienen decisiones no estructuradas que pertenecen a aquel grupo que deben ser manejadas por expertos o semi-estructuradas donde la decisión involucra aspectos subjetivos, como buen juicio y experiencia. Por lo general la mayoría de las decisiones a nivel operacional son altamente estructuradas. En cambio las de nivel estratégico son relativamente poco estructuradas. (Casas y Navón, 1997)] la idea que un sistema de computación disponible entregue la solución, está siendo sustituida por una estructura denominada Sistema de Apoyo a la toma de Decisión también conocida como Decisión Support Systems (DSS) (Soncini-Sessa et al, 1991), en el cual la persona encargada de tomar la decisión maneja un set de herramientas tales como modelos hidrológicos, bases de datos, modelos de manejo de sistemas, procesadores gráficos y numéricos, y otros, para aprovecharlos para encontrar él mismo su propia solución. La literatura en la materia está creciendo considerablemente (Sprague y Carlson, 1982; Parker y Al-Utabi, 1986; Guariso y Werthner, 1989) y algunas aplicaciones en manejos de embalses se han publicado recientemente (South Florida Water Management District, 1987; Loucks, 1990; Simonovic y Savic, 1989).

Aunque se habla de los Sistemas de Apoyo a la toma de Decisión desde hace ya más de diez años, la definición de un DSS varía substancialmente de un autor a otro. Una de ellas es la definición basada en la arquitectura conceptual DSS propuesta por Guariso and Werthner en 1989. Ellos identifican cinco componentes fundamentales en un DSS (figura 2.1.2).

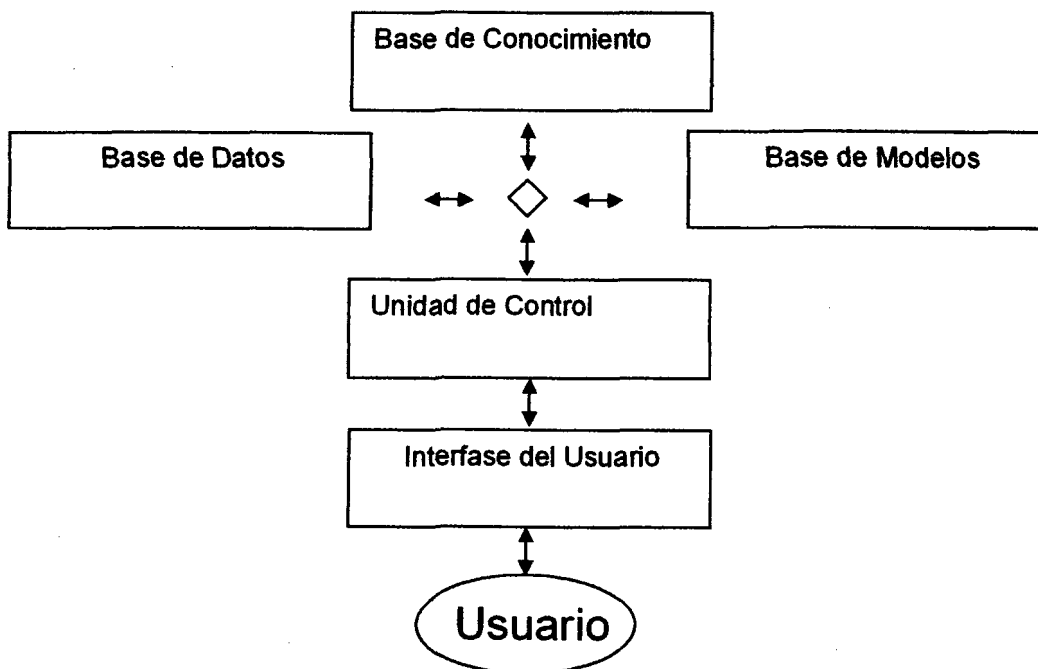


Figura 2.1.2. Arquitectura de DSS según Guariso y Werthner (1989)

2.2.- Modelos Hidrológicos de Manejo y Planificación de Cuencas

Algunos ejemplos específicos de modelos destinados al manejo y planificación óptima de sistemas de recursos de agua, informados en la literatura técnica en los últimos años, se describen a continuación.

2.2.1.- ARSP

ARSP (Acres Reservoir Simulation Program), es un modelo multipropósito de simulación multireservorio desarrollado por Acres International Corporation en 1972 y comercializado actualmente por BOSS Internacional. Se encuentra disponible para ser descargado desde la página:

http://www.bossintl.com/html/arsp_overview.html

a un costo de US\$ 2995.00. El modelo está diseñado principalmente para ser utilizado para la planificación a corto y mediano plazo, pero puede ser utilizado también en la planificación diaria.

El modelo ARSP utiliza dos niveles de representación del sistema hídrico (Acres, 2004). El primero se llama esquema nodo-conexión y en él las uniones y puntos de control (embalses) se representan como nodos, y los cauces naturales o artificiales son las conexiones. El segundo esquema se denomina nodo-arco, y en este cada elemento de la red (canales, embalses, etc.) se representa por uno o más elementos más pequeños llamados arcos. Cada arco posee las siguientes propiedades:

- Nodo de aguas arriba
- Nodo de aguas abajo
- Flujo en el arco
- Límite superior de flujo o volumen almacenado en el arco
- Límite inferior de flujo o volumen almacenado en el arco
- Un costo, o penalización, por unidad de flujo o volumen almacenado en el arco

Cada arco tiene una dirección de flujo implícita, desde el nodo de aguas arriba hacia el de aguas abajo, y la dirección del flujo es siempre en esa dirección. Cada elemento del sistema hídrico (canal, embalse, etc.) puede representarse por varios arcos con distintos costos y direcciones de flujo asociados de manera de poder modelar la política de operación del sistema. Por ejemplo, los embalses se representan mediante varios arcos, el primero es un arco sin costo que representa al volumen deseado en el embalse, mientras que los siguientes son arcos con distintos costos asociados que representan la penalización por alejarse de este óptimo.

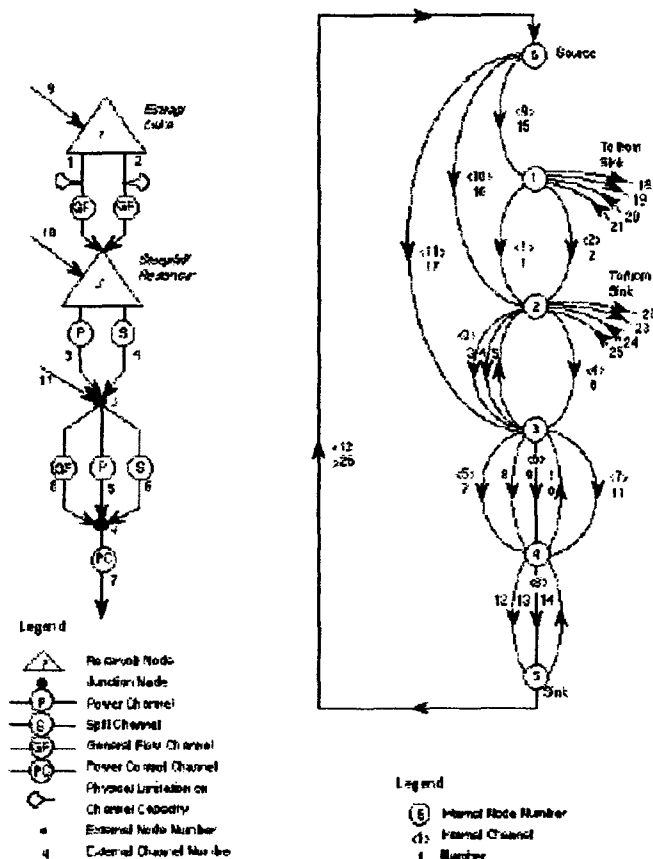


Figura 2.2.1. Esquema de representación nodo-conexión y nodo-arco

El modelo, en cada paso de tiempo de la simulación, asigna un flujo a cada arco de manera de minimizar el costo total de los flujos, es decir:

$$\text{Min} \sum_{ij} c_{ij} \cdot q_{ij} \quad \forall i, j \quad (0.1)$$

sujeto a:

$$\sum_j q_{ij} - \sum_j q_{ji} = 0 \quad \forall i \quad (0.2)$$

$$L_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij} \quad \forall i, j \quad (0.3)$$

donde: c_{ij} corresponde al costo asignado al arco desde el nodo i al j ,
 q_{ij} corresponde al flujo del arco desde el nodo i al j ,
 L_{ij} corresponde al flujo mínimo que puede existir en el arco desde el nodo i al j ,
 U_{ij} corresponde al flujo máximo que puede existir en el arco desde el nodo i al j .

La primera restricción (ecuación (0.2)) corresponde a la condición de continuidad, mientras que la segunda (ecuación (0.3)) asegura que la solución sea posible.

Para realizar la optimización el modelo ARSP utiliza el algoritmo de optimización de redes "out-of-kilter" (Ford and Fulkerson, 1962, Durbin and Kroenke, 1967, Woolsey and Swanson, 1975, Jensen and Barnes, 1980), el cual tiene las mismas limitaciones de los métodos de optimización lineales, por lo que las restricciones del sistema deben ser lineales. Por ello, las restricciones no lineales, como por ejemplo, la relación volumen-elevación en los embalses, curvas de eficiencia de centrales de generación, funciones de pérdida de carga, etc., deben ser representadas mediante una serie de tramos rectos.

El método "out of kilter", tiene como premisa básica el hecho que la asignación óptima de flujo se alcanza cuando todos los arcos están "in kilter", es decir cuando cumplen las condiciones que se detallan a continuación:

$$\text{Si } \bar{c}_{ij} < 0 \Rightarrow q_{ij} = U_{ij} \quad (0.4)$$

$$\text{Si } \bar{c}_{ij} = 0 \Rightarrow L_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij} \quad (0.5)$$

$$\text{Si } \bar{c}_{ij} > 0 \Rightarrow q_{ij} = L_{ij} \quad (0.6)$$

donde: $\bar{c}_{ij} = c_{ij} + \pi_i - \pi_j$, y

π_i es el costo de una unidad de flujo en el nodo i .

Los arcos que no cumplen con las condiciones (0.4), (0.5) y (0.6) se denominan arcos "out of kilter", los cuales también corresponden a arcos que poseen un flujo posible (que se encuentre entre los límites asignados por el usuario).

El algoritmo evalúa todos los arcos y les asigna el valor 0 si están "in kilter", 1 si el flujo debe aumentarse para transformar el arco en "in kilter", y -1 si el flujo debe ser disminuido. El algoritmo selecciona un arco "out of kilter" arbitrario que une los nodos i y j , y ajusta su flujo para cambiar su estado a "in kilter". Posteriormente se verifican los flujos de todos los arcos que salen del nodo j para determinar si es posible cambiarlos de manera de hacer el arco desde el nodo i al j un arco "in kilter". Si se encuentra un nodo posible de cambiar, este se agrega al circuito, y se determina si el circuito está completo (los arcos que salen del nodo j llegan al nodo i). Si el circuito no está completo, el algoritmo busca un arco adicional que pueda cambiar su flujo sin transformarse en "out of kilter" y que permita completar el circuito. Si no se encuentra este arco se aumenta el flujo en el circuito en el valor mínimo que permita que un arco "out of kilter" y que permita extender el circuito para que se transforme en "in kilter" (de manera de extender el circuito). Si el circuito está completo, el flujo se aumenta en el mínimo valor posible y se comienza de nuevo el algoritmo.

Para determinar la alternativa a utilizar se debe asignar una prioridad a los embalses, ya que existen múltiples alternativas de asignación de flujos con el mismo costo, especialmente si se cuenta con gran cantidad de embalses con penalizaciones o costos similares.

Otra política de manejo de embalses consiste en obtener un equilibrio en el uso de los embalses. Para esto el usuario debe definir una “Estrategia de Extracción”, que consiste en determinar si las extracciones se realizarán en cantidades similares o en porcentajes del volumen almacenado similares. También se debe definir un “Parámetro de Extracción”, que consiste en determinar si se balancearán los volúmenes o los niveles de los embalses. Finalmente se debe definir una “Posición de Referencia”, que corresponde al nivel bajo el cual se intentará obtener un equilibrio.

2.2.2.- MODSIM

MODSIM es un modelo de planificación de recursos hídricos desarrollado por la Universidad de Colorado State en lenguaje de programación PERL. El U.S. Bureau of Reclamation utiliza este modelo en la ciudad de Fort Collins, en la ciudad de Greeley, en Colorado Springs, y en el Imperial Irrigation District. El programa está disponible para ser descargado gratuitamente en la página <http://modsim.engr.colostate.edu/>.

El modelo distribuye el agua basado en criterios institucionales (incluyendo derechos de aguas) en una manera consistente con la hidrología y física de la cuenca, para esto el modelo simula múltiples tipos de derechos de aguas entre los que se cuentan:

- Derechos de agua directos (incluyendo derechos condicionales)
- Derechos de agua en el cauce
- Derechos de agua de embalses
- Derechos de operación de embalses
- Intercambios (e.g., augmentation, subordination)

En el modelo los elementos de acumulación (embalses) y de conexión (confluencia de ríos) se representan como nodos, mientras que los elementos de transporte (ríos) se representan por arcos que conectan los nodos. El modelo para cada intervalo de tiempo minimiza los costos asociados a los flujos en cada uno de los arcos. El costo asociado a un arco se calcula multiplicando el costo unitario definido por el usuario con el flujo que circula por el arco sujeto a que la suma de los flujos que entran a un nodo sea igual a la suma de los flujos que salen del nodo y a que el flujo en los arcos se encuentre entre los límites inferior y superior definidos por el usuario. Cada arco tiene un sentido de flujo predeterminado no pudiendo circular agua en sentido inverso, en caso de que esto pudiera ocurrir en el sistema real es necesario agregar otro arco con sentido inverso entre los dos nodos.

El sistema de optimización utilizado es un algoritmo ascendente en dos coordenadas basado en la relajación Lagrangiana (Bertsekas, 1991), el cual es comparativamente superior al algoritmo “out-of-kilter” (Labadie, 1994).

Dentro de las reglas de operación de los embalses se encuentran los derechos de almacenamiento, estos derechos compiten con los derechos de

flujo que existan en la red hídrica. Estos derechos de almacenamiento se calculan anualmente.

Los embalses pueden representarse ya sea a través de un solo elemento o mediante varios elementos de almacenamiento o "subembalses". Cada uno de estos "subembalses" funciona para el embalse como una cuenta de almacenamiento que entrega a un usuario específico o pueden funcionar como el volumen de agua almacenada bajo un cierto derecho de agua. La diferencia de funcionamiento entre un embalse representado por un elemento a uno representados por múltiples elementos, es que en el primer caso la descarga del embalse se determina mediante la optimización del sistema, lo que significa que la demanda de cierto usuario puede ser satisfecha por un embalse en el cual no poseía almacenamiento, mientras que en el caso de múltiples elementos la descarga del embalse se calcula como la suma de las demandas de los propietarios asociados a cada elemento.

2.2.3.- REALM

REALM (REsource ALlocation Model) es un programa computacional que permite simular la operación de un sistema de abastecimiento de agua durante sequías o durante periodos de flujo normal o crecidas. El programa fue desarrollado y verificado por el Victorian Department of Sustainability and Environment, contando desde 1997 con el apoyo de la Victoria University of Technology. El programa se encuentra disponible en la dirección:

<<http://www.nre.vic.gov.au/web/root/Domino/vro/vrosite.nsf/pages/water-surfacemod>>.

El programa divide el sistema en tres tipos de elementos: nodos (embalses, uniones, etc); portadores (canales y tuberías); y reglas de operación (restricciones en la demanda y objetivos de embalses). En cada intervalo de tiempo REALM optimiza la asignación del agua mediante un algoritmo lineal de redes, minimizando el costo total del transporte del agua, que corresponde a la suma del costo de transporte de todos los portadores, el cual se calcula a su vez multiplicando el costo unitario asignado al transportador por el flujo.

Para calcular el flujo total en el sistema REALM utiliza la regla de operación de *restricción en la demanda*, la cual corresponde al factor en que se reducirá el abastecimiento de la demanda. REALM define tres tipos de demanda (Victoria University of Technology and Department of Sustainability and Environment, 2001):

- **La demanda sin restricciones:** que corresponde a la demanda especificada por el usuario.
- **La demanda restringida:** que corresponde a la utilización de la restricción en la demanda. La demanda restringida corresponde a la multiplicación de la demanda sin restricción por la restricción en la demanda.
- **La demanda racionada:** la demanda restringida puede ser reducida aun más si esta es mayor al volumen almacenado más las recargas del período.

Una vez que se obtiene el flujo total que entregarán los embalses para cumplir las demandas este se reparte entre los embalses y las demandas según los siguientes criterios:

- **Embalses:**

Se debe ingresar un nivel óptimo del embalse y el número de zonas sobre y bajo este nivel óptimo, las cuales se utilizan para definir que embalse será utilizado para satisfacer una demanda, esto es, entre dos o más embalses se utilizará el agua del embalse que tenga su nivel en la zona más cercana al óptimo, en caso de que se encuentren en la misma zona se selecciona según la prioridad del embalse, la cual es ingresada por el usuario.

- **Demandas:**

En el caso de la demanda urbana y en el caso de existir una restricción en la demanda, la asignación se realiza mediante prioridades y zonas de déficit, el programa disminuye la demanda del elemento que tenga su abastecimiento en la menor zona de déficit. En caso de encontrarse en la misma zona, se utiliza la prioridad y el abastecimiento se disminuye sólo hasta llegar a la zona siguiente y luego se vuelve a comparar las opciones.

En el caso de la demanda agrícola, al existir una restricción en la demanda, la asignación de los recursos de agua se realiza en función del porcentaje de la demanda satisfecha en los períodos anteriores. Existen dos maneras de asignar el agua en el caso de demanda agrícola:

- **Por factores de regresión:** la restricción en la demanda es una función lineal del porcentaje de asignación y de la demanda del mes anterior, a través de dos coeficientes ingresados por el usuario.
- **Con la ayuda de curvas límite:** la restricción en la demanda es función del porcentaje de entrega anunciado y la entrega total a final de temporada, ambos parámetros son ingresados por el usuario.

Además es posible definir *objetivos de embalses*, los cuales corresponden a la proporción del almacenamiento total en los embalses que será utilizado en cada embalse, para cada nivel del almacenamiento total.

2.2.4.- RiverWare

RiverWare es un DSS (Decisión Suport System) que permite modelar embalses y ríos desarrollado por la Universidad de Colorado para el CADWEST (Center of Advanced Decision Support and Environmental Systems), la versión 4.4 está disponible desde Febrero de 2004 en la página < <http://cadswes.colorado.edu/riverware/>> .

Todos los elementos del sistema hídrico (embalses, tramos de ríos, canales, centrales de generación, y otros) se representan mediante objetos. Cada objeto posee una lista de métodos que representan algoritmos que modelan los fenómenos físicos asociados a él, además de "ranuras" donde se almacenan las variables asociadas a la resolución del algoritmo. Por ejemplo, los embalses tienen una estructura de datos formada por la recarga, descarga, almacenamiento y elevación. La topología del sistema se construye uniendo las estructuras de datos adecuadas de los objetos, por ejemplo la descarga de un río se une con la recarga del embalse de aguas abajo.

Cada objeto tiene *métodos de envío*, que regulan configuración entrada/salida para la correcta solución del algoritmo, y *métodos seleccionables por el usuario*, que son representaciones alternativas para modelar el elemento. Por ejemplo, los objetos de embalses tienen una serie de métodos de envío para resolver la ecuación de balance de masa, si se conoce la recarga y la elevación de la superficie, se invoca el método de envío para obtener la descarga y el almacenamiento. Además el usuario posee la opción de seleccionar entre varios métodos para obtener la evaporación como parte del balance de masa del objeto.

La representación por objetos tiene una gran ventaja desde el punto de vista de la actualización del modelo, ya que métodos nuevos pueden agregarse fácilmente para representar fenómenos particulares no considerados en la programación inicial, sin la necesidad de tener que alterar mayormente el código. Adicionalmente, RiverWare posee opciones para modelar la calidad de las aguas.

RiverWare tiene la capacidad tanto de realizar simulaciones basadas en reglas de operación, o de realizar una optimización del sistema (Zagona and Magee, 1999).

- **Simulación.**

Este proceso funciona en sistemas totalmente definidos. Consiste en que cada objeto cuenta con suficiente información para ejecutar el método de envío seleccionado por el usuario. El método de envío calcula las variables desconocidas en el objeto y ésta información se propaga a través del sistema por las uniones entre los objetos. Si existe algún objeto que no tenga los valores requeridos para ejecutar el método de despacho, el modelo puede seguir corriendo, quedando parte del modelo sin solución.

En los casos en que existen múltiples uniones entre objetos la solución se obtiene iterando hasta alcanzar un criterio de convergencia o hasta alcanzar un límite de iteraciones.

A pesar de que el contador de tiempo sigue aumentando, ciertos objetos pueden resolverse en cualquier período de tiempo cuando reciben la información requerida para ese período, lo cual permite tener una libertad en la forma de plantear el problema. La solución no se obtiene sólo desde aguas arriba hacia aguas abajo y avanzando en el tiempo, lo que permite, por ejemplo, en el caso de simulaciones basadas en reglas, plantear objetivos como volúmenes almacenados requeridos al final de la simulación.

- **Simulación basada en reglas.**

En la simulación basada en reglas, la información no es suficiente para resolver los métodos de todos los objetos, por lo que se necesita información adicional. Esta información se introduce a través de reglas de operación, las cuales se basan en construcciones *if-then* que se generan a través de un asistente y pueden asignarse a todos los objetos o sólo a un grupo de ellos.

El modelo ejecuta primero todos los métodos de despacho factibles, dados los datos ingresados por el usuario. Luego se ejecuta la regla de operación que posee la prioridad más alta, si esta regla de operación falla (ya sea porque no existen los valores en las ranuras necesarias o se intenta modificar una ranura modificada por una regla de operación con mayor prioridad) se ejecuta la regla de operación que sigue en prioridad, y así sucesivamente hasta que alguna regla de operación se ejecute exitosamente. Una vez que se ejecuta una regla de operación, se ejecutan nuevamente todos los métodos de despacho posibles (los cuales son más debido a las ranuras llenadas por la regla de operación), y luego se vuelve a ejecutar las reglas de operación. Este proceso se repite hasta que no resten regla de operación sin ejecutar, momento en el cual, se avanza al siguiente período de tiempo. Al igual que en los procesos de simulación, no existe seguridad de que el sistema sea resuelto completamente.

- **Optimización.**

El algoritmo de optimización utilizado por RiverWare es la "pre-emptive goal programming" (Eschenbach et al., 2001, Can and Houck, 1984, Loganathan and Bhattacharya, 1990), el cual permite realizar optimizaciones multiobjetivo, evitando la necesidad de asignar y justificar pesos específicos a cada uno de los objetivos (Schultz, 1989). Este algoritmo utiliza programación lineal, por lo cual las funciones objetivo y las restricciones deben ser lineales, para lo cual el programa cuenta con sistemas de linealización seleccionables por el usuario.

El "pre-emptive goal programming" consiste en realizar la optimización de las distintas funciones objetivo en forma secuencial de acuerdo a su prioridad. Durante la optimización de cada función objetivo las soluciones de las optimizaciones anteriores se mantienen como restricciones.

Las funciones objetivo son creadas por el usuario a través de un editor incorporado a RiverWare, estas consisten en maximizar variables de satisfacción en lugar de minimizar variables de desviación, ya que de esta manera se mejora el funcionamiento del algoritmo de optimización (Eschenbach et al., 2001).

2.2.5.- AQUARIUS

AQUARIUS (<<http://www.fs.fed.us/rm/value/aquarius.html>>) es un modelo orientado a objetos que permite una distribución eficiente de recursos en un sistema hídrico desarrollado en la Colorado State University.

Este programa incluye los usos no tradicionales (e.g. actividades recreativas) del agua dentro de la estructura de costos a optimizar. El programa divide el sistema en componentes, entre los que están embalses, zonas de demanda agrícola, y actividades recreativas en tramos de ríos. El programa tiene incorporados componentes que representan los elementos típicos de un sistema hídrico, cada uno de estos elementos tiene una función que lo representa y una función de beneficio asociada, además el programa cuenta con la posibilidad de que el usuario defina tipos de elementos especiales con funciones adicionales.

La distribución de los flujos se realiza de tal manera de maximizar los beneficios del sistema para todos los intervalos de tiempo sujeto a restricciones tanto físicas como administrativas (Díaz, 1996). La técnica de solución utilizada en AQUARIUS reduce la curva de la función objetivo a una ecuación cuadrática mediante una serie de Taylor. Para esto el programa, dada una solución inicial posible, realiza una expansión de Taylor alrededor de esta solución, reteniendo los términos de primer y segundo orden de estas, para luego realizar la maximización del sistema cuadrático resultante sujeto a restricciones lineales y de no negatividad. De esta primera maximización se obtiene una segunda solución posible, con la cual se repite el proceso hasta alcanzar la convergencia.

2.2.6.- SARH-2000

2.2.6.1.- Contribución de Sarh-2000

El aporte que realiza este modelo en el campo de la gestión de los recursos hídricos, se concentra en el desarrollo de un procedimiento que potencia las posibilidades de búsqueda de soluciones, uniendo dos enfoques clásicos de la investigación de operaciones que son: la simulación y la optimización, brindando al gestor de un sistema hídrico complejo una herramienta dinámica que le permite fácilmente personalizar tanto el problema como la búsqueda de la gestión óptima del sistema global.

El aporte se materializa a partir de la combinación estratégica de tres herramientas matemáticas y cuatro conceptos básicos, que ya han sido utilizados en forma separada por otros investigadores en el pasado. Las tres

herramientas son la *simulación de procesos continuos*, las *redes neuronales artificiales* y los *métodos de optimización*. Los cuatro conceptos son la *utilización de reglas y restricciones*, la *parametrización de reglas de operación*, el *cálculo de medidas de efectividad de los distintos usos del sistema* y la *ponderación relativa del multipropósito y de medidas de efectividad de los usos*. La combinación de estas 7 piezas fundamentales, permitió generar novedosas y potentes ideas, tales como la utilización de las redes neuronales artificiales para construir un modelo matemático mixto resultante de la mezcla del modelo de simulación del sistema hídrico y del modelo de optimización seleccionado, que resalta las bondades de ambos al funcionar en forma simultánea y minimiza las limitaciones de cada método usado en forma independiente. Como resultados de este trabajo se introduce un concepto simple, pero potente, el cual consiste en la construcción de *funciones objetivo dinámicas* adaptables fácilmente por el usuario para realizar la búsqueda de políticas de gestión óptimas de acuerdo a los requerimientos cambiantes de los usuarios, sin necesidad de modificar el modelo de simulación.

Este sistema de apoyo computacional, da la posibilidad al usuario para adaptar fácilmente el modelo matemático a las variaciones constantes del sistema físico real, las cuales son inevitables por el dinamismo de la oferta y las demandas de agua. Este mismo sistema computacional le permite adaptar la respuesta del modelo a los cambios de las condiciones de entorno tales como las prioridades relativas asignadas a los distintos propósitos y fijar una importancia relativa a cada índice de evaluación del fallo de cada uso.

El sistema SARH-2000, incluye varios sistemas de modelación entre los que se destacan:

- a) Un ambiente de simulación de procesos continuos que permite al usuario modelar con detalle y precisión sistemas complejos de recursos hídricos que incluyan múltiples embalses, acuíferos, elementos de distribución de agua, y simular distintas políticas de operación del sistema de aprovechamiento y distribución de agua, bajo distintos estados de las variables iniciales y distintos pronósticos probables de la oferta y de demanda de agua. De esta forma, entrega al administrador la posibilidad de visualizar gráficamente y almacenar digitalmente la evolución de los valores de todas las variables de interés durante el proceso de simulación.
- b) Un módulo de diseño, entrenamiento, validación y prueba de redes neuronales artificiales que incluye un sistema dedicado a desarrollar tales modelos para el pronóstico de volúmenes de escurrimiento en cuencas pluvio nivales y para encapsular el comportamiento del modelo de simulación.

Este último debe ser capaz de entregar las mismas respuestas que el modelo de simulación (indicadores de evaluación de fallo) para las mismas prioridades de uso, políticas y restricciones de operación.

- c) Un módulo de apoyo a la toma de decisiones que utiliza el modelo de red neuronal para encapsular al modelo de simulación y permitir al usuario definir su propia función objetivo y buscar dentro de un espacio de soluciones acotado por las restricciones dadas por el propio usuario, aquella política de gestión que optimice el valor de la función objetivo formulada.
- d) Un sistema de control (figura 2.2.2) que permite al usuario: interactuar con los distintos ambientes incluidos en el sistema bajo un entorno tipo *Windows*®, crear el modelo de simulación de un sistema hídrico complejo, crear y modificar fácilmente las reglas de operación de cada elemento para el control de aguas presentes en el sistema, desarrollar modelos de redes neuronales, gestionar las bases de datos, visualizar resultados, alternar de un ambiente a otro y elegir, en base al análisis de índices de evaluación de fallo del sistema, aquel conjunto de reglas que optimice la gestión del sistema en base a una función objetivo diseñada por el propio usuario, dando la posibilidad al usuario de personalizar los propósitos de la gestión a través de los valores de importancia relativa que el mismo asigne a cada uso y la importancia relativa dada a cada índice de evaluación de fallo para cada uso o propósito en particular.

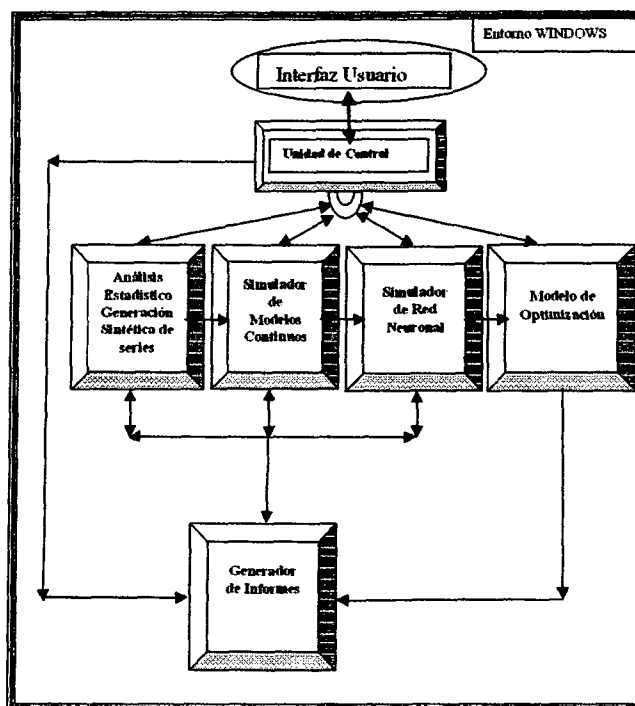


Figura 2.2.2. Arquitectura del ambiente SARH-2000

2.2.6.2.- Metodología de Búsqueda de mejores alternativas de operación

La metodología de apoyo a la gestión que permite implementar SARH-2000 se basa en el enfoque de análisis de sistemas Gerez y Grijalva (1988) y dentro de este enfoque utiliza los métodos de simulación y de optimización derivados del campo de la investigación de operaciones. El método propuesto está orientado a resolver problemas de búsqueda de soluciones dentro de un espacio de búsqueda formado por el espacio de estados factibles y las reglas de transición entre estados, donde la solución al problema puede ser un estado final deseado o la trayectoria de solución misma. Ambos enfoques, simulación y optimización, difieren en la forma de definir dicho espacio de estados. En simulación este espacio de estados puede ser discontinuo, lo que imposibilita en tal caso la búsqueda de soluciones óptimas, en cambio uno de los requerimientos del método de optimización es que el espacio de estados esté definido mediante una o varias funciones continuas y diferenciables. Esto marca una gran diferencia conceptual en la forma de encarar la búsqueda de soluciones por uno u otro enfoque. Este trabajo comprueba que pueden salvarse estas diferencias y acoplar ambos enfoques en uno nuevo que combine ambos métodos en un solo método de búsqueda, lo que se logra utilizando un proceso de encapsulamiento del modelo de simulación en un modelo de red neuronal artificial de tal manera que la red represente lo más fielmente posible al modelo. El modelo de red neuronal es un modelo continuo y diferenciable que representa aproximadamente al espacio de estados del modelo de simulación, y su introducción en un modelo de optimización no lineal permite suavizar las discontinuidades propias del modelo de simulación constituyendo el elemento fundamental de la metodología de búsqueda de soluciones combinada presentada en este trabajo. Así planteado el método, es por naturaleza totalmente general y puede ser aplicado para abordar tanto problemas de análisis de alternativas de operación basado en riesgo como de análisis de alternativas de operación basado en certeza.

La figura 2.2.3 muestra un diagrama de bloques que representa la estructura del proceso de búsqueda de soluciones implementado bajo este nuevo enfoque que combina las técnicas de simulación y optimización.

El proceso de búsqueda se inicia con la elaboración de una base de información de las variables que se necesitan tener en cuenta en el problema a resolver, en particular las variables hidroclimáticas de la cuenca, dicha información se utiliza para elaborar los modelos de pronóstico de escurrimiento superficial utilizando la técnica de redes neuronales artificiales. Si se genera sintéticamente las variables climáticas explicativas del escurrimiento, se podrán generar a través de este modelo, series sintéticas de escurrimiento para un horizonte de tiempo dado.

Otros datos necesarios para la elaboración del modelo de simulación son las características de los atributos y la definición de los enlaces entre objetos y variables, interacción entre variables y medidas de efectividad que se deseen incluir en el problema. Esta información unida al conjunto de reglas de operación determinísticas que fijan ciertas condiciones y restricciones al espacio de estados factibles y a un conjunto de reglas de operación parametrizadas de aquellos elementos que el analista ha seleccionado como elementos de control dentro del sistema (embalses, compuertas derivadoras, sistemas de bombeo, etc.) permiten diseñar el modelo de simulación continua.

Una vez elaborado y validado el modelo de simulación es posible seguir dos tipos de análisis de alternativas de operación: análisis de alternativas de operación basado en certeza, un análisis de alternativas de operación basado en riesgo.

Los dos tipos de análisis pueden ser encarados utilizando el esquema presentado en la figura 2.2.3, pero difieren en el modo de utilizar las capacidades de los distintos módulos, según se detalla continuación.

El análisis de alternativas de operación basado en certeza es muy útil realizarlo para evaluar cuán buena es una alternativa de operación del sistema respecto de otras, sometidas todas a la misma secuencia de acontecimientos futuros. Dicha secuencia de acontecimientos, adoptada como conocida, puede estar determinada por ejemplo por la serie de volúmenes de aportación mensual histórica que ingresaron al sistema para un período definido como el horizonte de estudio. Este tipo de análisis, si bien no aparece como el más indicado para tomar decisiones bajo situaciones de riesgo, es útil y computacionalmente eficiente al momento de comparar varias reglas de operación alternativas y orientar al decisor sobre cual o cuáles de todas las reglas se comportaría mejor frente al escenario futuro elegido como cierto, permitiéndole establecer pautas de operación a nivel de planificación, en base al cálculo, para la secuencia de acontecimientos futuros analizada, de la frecuencia de fallo, probabilidad de recuperación a estados de fallo o resiliencia y severidad de fallos o vulnerabilidad para cada uno de los propósitos que debe satisfacer el sistema Loucks y Sigvaldason (1982) (ver figura 2.2.3). Por supuesto mientras más larga sea la serie de acontecimientos futuros a los que se somete a las políticas alternativas, las medidas de efectividad obtenidas para compararlas tenderán a sus valores esperados, garantizando la calidad del análisis. Si la serie histórica de acontecimientos es suficientemente larga, es preferible su utilización en lugar de la generación de series sintéticas equiprobables a la histórica. Al contrario, si la serie histórica no es lo suficientemente extensa, es preferible la utilización de una serie sintética con una longitud que garantice la calidad del análisis.

Proceso de Búsqueda



Figura 2.2.3. Implementación del proceso de búsqueda de soluciones.

Para llevar a cabo un análisis de alternativas basado en certeza, dentro del esquema presentado en la figura 2.2.3 se debe definir en primer lugar, mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros, el espacio de búsqueda, esto es, los límites superior e inferior de los parámetros incluidos en las reglas de operación de los elementos de control seleccionados. Una vez definidos los límites del espacio de búsqueda es posible generar, para una serie de aportaciones dada (puede ser la serie histórica o cualquier serie generada con el modelo de pronóstico), valores aleatorios de los parámetros a fin de construir un espacio de alternativas de operación suficientemente denso para permitir el entrenamiento de una red neuronal artificial que capture y generalice el conocimiento incluido en el modelo de simulación del sistema. Dado que no es posible conocer a priori la estructura del modelo de red neuronal, el número de ejemplos de entrenamiento (estados simulados) debe ser lo suficientemente grande para asegurar la buena capacidad de generalización de la red neuronal.

Finalmente la construcción del modelo de optimización se logra en base al armado de una función objetivo que depende del problema de optimización a resolver, por ejemplo la minimización de la medida de efectividad global del sistema (MEGS) constituida por una combinación lineal ponderada de índices de evaluación de fallo calculados para cada uno de los propósitos del sistema hídrico, sujeta a las restricciones físicas impuestas a los valores máximos y mínimos posibles de asignar a los parámetros de las reglas de operación.

$$M.E.G.S. = \sum_{i=1}^5 b(i) * \sum_{j=1}^3 \frac{p(i, j) * I(i, j)}{I_{max}(i, j)} \quad (0.7)$$

donde: i corresponde al tipo de propósito del sistema:

- 1) Riego
- 2) Hidroenergía
- 3) Control de Crecidas
- 4) Control de Anegamiento
- 5) Recreación.

j corresponde al tipo de índice de fallo:

- 1) Ocurrencia de Fallo
- 2) Complemento de Resiliencia
- 3) Vulnerabilidad

$b(i)$ importancia relativa asignada a cada propósito i por el usuario,

$p(i, j)$ importancia relativa (peso) asignado por el usuario al índice de fallo j del propósito i ,

$I(i, j)$ Valor del índice de fallo j del propósito i , y

$I_{max}(i, j)$ Valor máximo (alcanzado en las 3,500 simulaciones) del índice de fallo j del propósito i .

La forma de ponderación de índices y de propósitos que forman parte de la construcción de dicha función objetivo se puede realizar en base a una toma de decisión basada en análisis multicriterio, aunque generalmente termina siendo una decisión política del gestor del sistema.

2.2.7.- Algunos estudios realizados en Chile

A mediados de la década del 60, siguiendo los pasos del Harvard Water Program, se iniciaron algunos estudios de cuencas, mediante la realización de memorias de título de alumnos de las carreras de Ingeniería Civil en varias Universidades. Se pueden mencionar los estudios "Diseño de sistemas de aprovechamiento de los recursos hidráulicos por medio de simulación, aplicado a la cuenca del Maule (Altamirano y Pulido, 1967), estudio de planificación de los recursos de agua de los ríos Teno, Chimbarongo y Tinguiririca (Munita, 1968), y el modelo de simulación hidrológica de los recursos del valle de Limache. (Núñez, 1988).

Posteriormente, la Comisión Nacional de Riego en la década del 80 encargó estudios integrales de los recursos de agua y suelos de las cuencas de Aconcagua, (CICA, 1980) Maipo, Rapel, Mataquito (CICA, 1981) y Maule (CEDEC, 1977) a diversas firmas consultoras. Cada uno de estos estudios incluyó un modelo de simulación específico para cada uno de los sistemas. Algunos de estos modelos estaban concebidos de manera más o menos general y son aplicables a otros casos con pequeñas modificaciones.

Más recientemente, la Dirección General de Aguas ha encargado también a Consultores externos, el estudio integral de cuencas con el fin de desarrollar modelos de simulación y herramientas tendientes a apoyar el manejo y la operación de los recursos de agua en forma conjunta. Uno de los primeros estudios fue el encargado a CONIC-BF para la cuenca del río Maule. (CONIC-BF, 1997)

2.3.- Modelos Hidrológicos acoplados a Sistemas de Información Geográficos (SIG)

A diferencia de los modelos comentados anteriormente, este punto describe aquellos programas computacionales donde la preparación de datos y visualización de resultados, se realiza mediante una interfaz SIG comercial o desarrollada especialmente para estos efectos.

2.3.1.- WEAP21

WEAP (Water Evaluation And Planning) es una herramienta que toma una aproximación integrada a la planificación de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute's Boston Center del Tellus Institute. Se encuentra disponible para ser descargado en la página <<http://www.weap21.org/index.asp>>, existiendo licencias gratuitas para instituciones sin fines de lucro. Ha sido utilizada en proyectos de EE.UU., México, China, Asia Central, Africa, Egipto, Israel e India.

WEAP posee variadas capacidades:

- **Base de datos de balances hídricos:** posee un sistema para almacenar información sobre demandas y abastecimientos de agua.
- **Herramienta de generación de escenarios:** simula demandas, abastecimientos, flujos y almacenamientos, además de generación, tratamiento y descarga de contaminantes.
- **Herramienta de análisis de políticas:** evalúa opciones de desarrollo y manejo, y toma en cuenta muchos sistemas de uso de agua.

WEAP durante la simulación no realiza una optimización del flujo de agua a través del sistema, debido a que la premisa de la herramienta es la de ayudar al planificador y no reemplazarlo. Para esto realiza balances de masa entre los diferentes elementos del sistema hídrico, los cuales se dividen en términos de fuentes de abastecimiento (e.g. embalses, aguas subterráneas, embalses), instalaciones de extracción, transmisión, y tratamiento de aguas servidas, requerimientos ecológicos, demandas de agua y generación de contaminantes, permitiendo a la herramienta dirigirse a una gran cantidad de asuntos, como son los análisis de demanda sectorial, conservación de aguas, derechos de aguas y prioridades de asignación, simulaciones de aguas subterráneas y superficiales, operación de embalses, generación de energía hidroeléctrica, rastreo de contaminantes, requerimientos ecológicos, y análisis costo-beneficio.

Los pasos a seguir durante la utilización de esta herramienta generalmente son:

- **Definición:** se establece el marco de tiempo, los bordes espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- **Cuenta Actual:** se desarrolla una visión de las demandas de agua, cargas de contaminantes, recursos y abastecimientos.
- **Escenarios:** se crean distintos escenarios de funcionamiento futuro bajo diferentes supuestos o políticas.

- **Evaluación:** los escenarios son evaluados según su suficiencia de agua, costos y beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales y sensibilidad ante variaciones en alguna de las variables.

El sistema posee una interfaz gráfica basada en un SIG, que permite al usuario crear el modelo sobre mapas que pueden ser sobrepuestos o manipulados con alguna de las variadas herramientas que posee un SIG. Para esto se pueden importar al sistema mapas generados en Arcview o similares.

La estructura del WEAP21 está formada por cinco vistas principales:

- **Esquema:** en esta vista se encuentra la interfaz visual para configurar el sistema hídrico, las herramientas del SIG se encuentran dentro de esta vista.
- **Datos:** se crea el modelo, generando las variables y relaciones, ingresar supuestos o proyecciones usando expresiones matemáticas, para esto WEAP21 posee un vínculo dinámico con Excel®.
- **Resultados:** se muestran los resultados tanto como gráficos o como tablas.
- **Visión General:** se muestra una visión global de los parámetros más importantes del modelo, esta visión general es configurada por el usuario.
- **Notas:** se documentan los datos y supuestos del usuario.

Para realizar la simulación del funcionamiento del sistema, WEAP21 divide el sistema en nodos y arcos, para los cuales se realiza un balance de masa de agua y contaminantes mensualmente. En la simulación cada mes es independiente del anterior excepto por el almacenamiento en embalses y acuíferos, es decir el agua que entra al sistema es o almacenada o abandona el sistema en el mismo al final del mes, se asume esta instantaneidad debido a lo largo de los intervalos de tiempo (un mes), se debe tomar en cuenta que los flujos de retorno desde plantas de tratamiento de aguas servidas y otros también son devueltos durante el mismo mes. El algoritmo de solución utilizado por el programa es el siguiente:

- Se calculan las demandas, abastecimientos, y flujos requeridos.
- Flujo de entrada y de salida para cada nodo y arco del sistema. Esto incluye los retiros desde las fuentes de abastecimiento para satisfacer la demanda, y las descargas desde embalses. Estos se calculan mediante un método de programación lineal, que optimiza la cobertura de las demandas y los flujos requeridos, sujeto a prioridades de abastecimiento, preferencias de demandas, balances de masa y otras restricciones.
- Generación de contaminantes, en las zonas de demandas, flujo y tratamiento de estos, y descargas a cuerpos receptores.
- Generación de energía hidroeléctrica.
- Costo de la entrega del agua.

Los tipos particulares de elementos con que cuenta WEAP21 pueden encontrarse en el Manual de Usuario (Stockholm Environment Institute, 2001).

Este es un modelo bastante general para el cual no se visualizan mayores problemas para ser utilizado en Chile. Como ventaja para su aplicación al caso

chileno está la simplicidad con que representa los procesos, la mayoría de los cuales se representan a través de porcentajes, tasas o caudales ingresados por el usuario, así por ejemplo la recarga desde los acuíferos a ríos se ingresan como caudales fijos, las pérdidas en el abastecimiento de agua para sectores urbanos (filtraciones, uso de bomberos, etc.) se representan a través de un porcentaje de la demanda, los derrames de las zonas de riego también son representados como porcentaje de la demanda, etc. La experiencia en su aplicación indicará cuales son las situaciones que se logran representar de manera adecuada.

2.3.2.- MIKE BASIN

MIKE BASIN es un sistema de modelación para la planificación y gestión de recursos hídricos en forma integrada desarrollado por DHI Software. El sistema cuenta con una interfaz grafica para usuarios (Graphical User Interface, GUI) que interconecta las herramientas de modelación con un SIG en ambiente ArcView. Este sistema posee una gran versatilidad, por lo que ha sido utilizado en proyectos de planificación y administración de recursos hidráulicos en EE.UU., Perú, Malasia, Australia, Vietnam, Honduras y otros países.

Se encuentra disponible para ser descargado en el sitio <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/index.htm>.

El diseño de la arquitectura de datos de MIKE se muestra en la figura 2.3.1, los modelos MIKE INFO, MIKE SHE, MIKE 11 y MIKE 21 son sistemas funcionan independientemente a MIKE BASIN, pero que son compatibles para funcionar coordinadamente a este de manera de aumentar su funcionalidad.

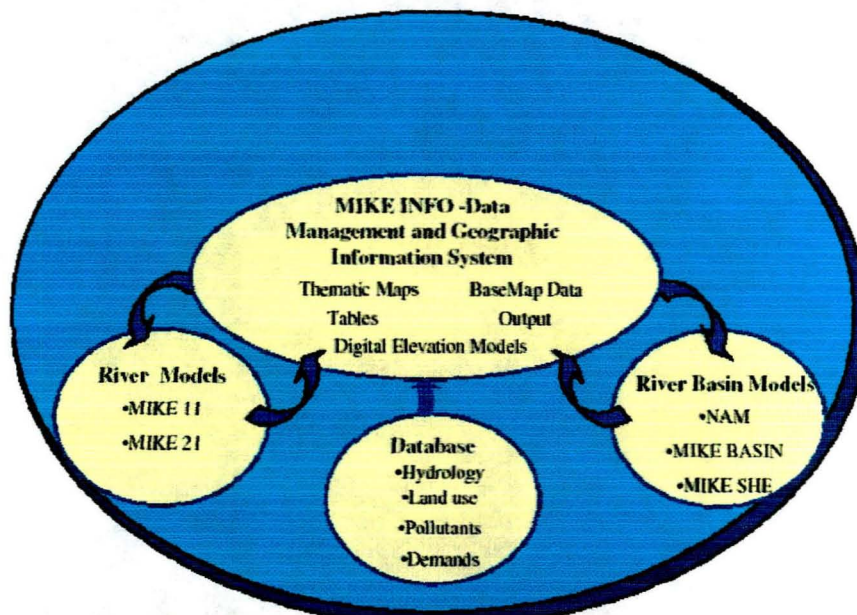


Figura 2.3.1. Sistema integrado para el manejo de cuencas (Larsen et al., 2001)

MIKE BASIN es un modelo de balance de masa que funciona como modelo de redes representa el sistema hídrico como una red de arcos y nodos, donde los arcos representan los tramos de ríos o canales y los nodos representan confluencias o un sitio donde existen intervenciones sobre el recurso hídrico. MIKE BASIN permite además modelar el flujo de contaminantes a través de la red hidráulica considerando la advección y el decaimiento. El sistema funciona realizando balances de masa entre los distintos elementos de la red y cuenta con rutinas especiales que permiten modelar:

- Embalses
- Agua Subterránea
- Centrales de Generación
- Usuarios de Agua, el sistema permite agregar demandas de agua explícitamente, basado en el uso de suelo (en el caso de demanda agrícola), o basado en información sectorial (industria, urbanización, etc.) a través de la demanda unitaria.

Durante la simulación los flujos de agua son asignados entre las distintas alternativas basándose en reglas de asignación, MIKE BASIN cuenta con los dos enfoques de reglas de asignación, existiendo además la opción para que el usuario defina su propio sistema de asignación:

- **Reglas de prioridad local:** la distribución del agua en un nodo se realiza considerando los usuarios inmediatamente conectados a él. En el caso del agua subterránea, esta prioridad es estricta, es decir el usuario con mayor prioridad local recibe su demanda completa (si esto es posible) y luego al usuario que tiene la siguiente prioridad se le satisface su demanda (si es posible con el agua sobrante) y así sucesivamente. En el caso del agua subterránea todos los usuarios tienen la misma prioridad y por lo tanto reciben la misma proporción de su demanda de agua subterránea.
- **Reglas de prioridad global:** las reglas de distribución consideran cualquier nodo de todo el sistema. por ejemplo se puede definir una regla que indica que cierto usuario bastante aguas abajo de la captación debe satisfacer su demanda. Múltiples reglas pueden ser creadas con un ranking de prioridad para cada regla. Las reglas pueden ser definidas tanto en términos de la demanda, flujo en un tramo, y almacenamiento en un embalse o acuífero.
- **Distribución pública ("Integrated Water Resources Management"):** son reglas definidas por el usuario.

Además de permitir simular el funcionamiento de un sistema hídrico, MIKE BASIN permite realizar una optimización de este. Esta optimización puede ser realizada con cualquier función objetivo y cualquier restricción (aún si esta es no lineal) definida por el usuario, ya sea considerando aspectos económicos, de satisfacción de la demanda, calidad ambiental, etc., considerando el sistema completo o sólo un sector de este. Para esto el sistema incorpora un vínculo con Excel®, a través del cual se pueden utilizar las macros y el Solver de optimización de este programa.

Para generar las series de caudales que ingresan al sistema MIKE BASIN permite al usuario introducir las series de tiempo, mediante inferencia directa a partir de los flujos observados, o a través de uno de los dos modelos de precipitación escorrentía, los cuales son:

- **NAM:** es un modelo conceptual agregado que permite calcular los flujos, superficial, subsuperficial y subterráneo, generados por una superficie como función del contenido de humedad en cada uno de los siguientes almacenamientos:

- Almacenamiento nival
- Almacenamiento superficial
- Almacenamiento en la zona de raíces
- Almacenamiento subterráneo

Además el modelo permite incorporar intervenciones humanas, tales como regadío y bombeo desde el agua subterránea.

- **SMAP:** es un modelo de humedad del suelo que funciona a intervalos mensuales.

Este es un modelo bastante general por lo cual debiera ser posible de utilizar en variadas situaciones en Chile. Cuenta con varias formas para representar las demandas, las cuales varían en complejidad y en la cantidad de datos requeridos. Los datos de entrada pueden ser ingresados a través de series de tiempo, o calculados basándose en el uso de los suelos o en la información sectorial (demanda unitaria y número de usuarios).

Este modelo requiere un tiempo para entrenamiento de personal, adecuar y preparar la información de entrada necesaria. Adicionalmente, el modelo tiene un costo importante.

2.3.3.- MIKE INFO

MIKE INFO Land & Water (MILW) es un sistema de manejo de bases de datos que está formado por una serie de herramientas SIG que permiten al usuario manejar información espacial y temporal. El sistema utiliza el SIG ArcView y la base de datos JET de Microsoft®. Las series de tiempo son generadas con un editor que es compatible con productos Microsoft® tales como MS-Word y MS-Excel.

MIKE BASIN posee incluidas por defecto algunas de las herramientas de MIKE INFO, mientras que el resto deben ser adquiridas por separado. Las herramientas que posee MIKE INFO son:

- **Import & Transform Tools (incorporada a MIKE BASIN):** esta herramienta permite al usuario importar información externa (ArcInfo, Corine land cover data, Modelos de elevación digital del US Geological Survey).
- **Catchment Delineation Tool (incorporada a MIKE BASIN):** asiste al usuario en la generación de bordes y áreas aportantes, redes de flujos y mapas de ríos a partir de Modelos de Elevación Digital (Digital Elevation

Models, DEM), posee además la opción de generar un pseudo-DEM en los casos que no se cuente con uno, pero se cuenta con un archivo vectorial de ríos, en este caso las divisiones entre aportantes se calculan como la mitad de la distancia entre dos ríos adyacentes.

- **Vector and Grid Tools (incorporada a MIKE BASINS):** permite manipular y procesar archivos vectoriales y de grilla en ArcView.
- **Sampling Point Tools:** esta diseñada para manejar la información de estaciones hidro-meteorológicas o de calidad de aguas. Varias herramientas de procesamiento de series de datos permiten al usuario chequear, comparar y graficar datos directamente desde el SIG. Las series de tiempo pueden ser analizadas y las estadísticas extraídas desde una gran cantidad de estaciones. También son parte de estas herramientas curva de descarga y análisis de valores extremos.
- **Surface Tools:** pueden ser utilizadas para generar grillas de información a partir de datos puntuales, para lo cual cuenta con variados métodos de interpolación, y la opción de utilizar polígonos de Thiessen o el método de Isoyetas. Además se puede generar perfiles topográficos a través de líneas.
- **SeaGIS Tool (Soil Erosion Assessment GIS):** permite evaluar la erosión a través de la ecuación universal de pérdida de suelo (Universal Soil Loss Equation - USLE).
- **Land Classification Tools:** permite clasificar terrenos (elevación, pendiente, etc.) basado en el DEM, además permite determinar el comienzo y el final del período de crecimiento y el riesgo de heladas basado en información meteorológica. Además permite superponer variados criterios para obtener una nueva clasificación.

2.3.4.- WaterWare

WaterWare (<<http://www.ess.co.at/WATERWARE/>>) es un sistema de información para el manejo de recursos hidráulicos desarrollado por Enviromental Software and Services. Se trata de un software comercial que ha sido utilizado en los proyectos en el Mediterráneo, Malasia, Palestina, México, Inglaterra, y otros lugares.

El sistema está diseñado de forma modular con una programación orientada a objetos. Los módulos incorporados en el sistema son:

- **Información Geográfica:** incluye divisiones administrativas, uso y tipo de suelo, población, redes de transporte, cuerpos de agua, orografía (información digital de elevaciones), y fotografías aéreas y satelitales. Toda esta información se maneja mediante el SIG incorporado.
- **Observaciones en Estaciones de Monitoreo:** incluye conexiones en línea a estaciones de monitoreo y herramientas para el análisis estadístico de esta información.
- **Objetos de la Red de Cauces:** incluye nodos para representar diferentes fuentes y demandas de aguas y un sistema para incorporar fuentes de contaminantes.

- **Red de Cauces:** consiste en un editor gráfico para generar las redes de cauces a los que se integran los nodos.
- **Modelos de simulación:** incluye una serie de modelos, entre los cuales se cuentan un modelo de precipitación-escorrentía, un modelo de estimación de demanda de riego, un modelo de simulación de recursos hídricos, un modelo de calidad de agua, un modelo de flujo de agua subterránea y una interfaz para utilizar modelos externos.
- **Herramientas de ayuda en la toma de decisiones:** entre las que se cuentan herramientas post-procesamiento para la estimación de impactos y herramientas de optimización.

Algunos modelos incorporados en WaterWare son:

- **Modelo precipitación-escorrentía:** el RRM (rainfall runoff model) es un modelo agregado que funciona a intervalos diarios que obtiene sus datos de los objetos de la cuenca y sus series de tiempo asociadas de temperatura, precipitación y escurrimiento. Los elementos considerados son la intercepción, infiltración, humedad en la zona de raíces, evaporación, flujo superficial y subsuperficial, y agua subterránea superficial, el modelo considera un segundo nivel de agua subterránea más profunda, pero este es considerado como una descarga de la cuenca.
- **Modelo de Demanda de Riego:** cuenta con un modelo que está basado en el programa CROPWAT de la FAO que funciona a intervalos de tiempo mensuales.
- **Modelo de simulación de recursos hídricos:** este modelo funciona sobre la base de balances de masa entre los diferentes objetos que conforman el sistema hídrico

Entre las herramientas de ayuda para la toma de decisiones WaterWare no cuenta con un modelo que permita realizar una optimización del sistema de forma directa, sino que posee una herramienta que permite comparar las distintas alternativas simuladas bajo ciertos criterios de forma de seleccionar el mejor escenario desde el punto de vista del Pareto óptimo.

El sistema de información geográfico incorporado al WaterWare es un conjunto de herramientas que permite servir como base para la construcción del modelo del sistema hídrico y para la presentación de los resultados obtenidos de los modelos incorporados. Posee la posibilidad de trabajar tanto con información vectorial como raster, sobreponer mapas, etc.

Los datos necesarios para utilizar el programa son:

- **Información Geográfica** Mapas con límites administrativos, uso de suelos, fotografía aérea o información satelital y mapas escaneados pueden ser usados en conjunto con mapas vectoriales, modelos de elevación digital (DEM) para terrenos complejos; el sistema puede importar información para todos los SIG comunes; gráficos de la red de ríos (geometría) y la geometría de los segmentos (secciones, rugosidad) para todos los modelos de flujo en canales

- **Objetos de la Cuenca** Esto incluye clases como sub-cuencas aportantes, acuíferos, lagos y embalses, ciudades, industrias, áreas agrícolas y zonas de riego, representando los nodos del sistema hídrico; para cada objeto, y dependiendo del tipo de objeto se requiere información de la demanda de agua, usos, uso consuntivo y generación de contaminantes. Para los acuíferos, la información hidrogeológica es necesaria, para embalses son necesarias la morfología y las reglas operacionales
- **Información Hidrológica y Meteorológica** Series de tiempo (horarias a diarias) de la información meteorológica básica, cubriendo al menos un año o el período de interés para modelos a largo plazo: temperatura y precipitaciones, opcionalmente humedad relativa, velocidad del viento, cobertura de nubes y radiación solar, evapotranspiración potencial.
Son necesarias tres estaciones bien espaciadas para que la interpolación espacial produzca resultados
- **Información de Calidad de Aguas** Información observada a nivel horario a diario de una o más estaciones de monitoreo; localización de las estaciones. Muchas de las funciones de análisis estadístico requieren al menos tres estaciones de monitoreo relativamente bien distanciadas
- **Información Económica** Funciones de costo discreto (costos de inversión y operacionales) para una serie de alternativas de tratamiento para cada fuente contaminante considerada (sólo para el modelo de optimización de distribución de contaminantes)
- **Información Específica al Modelo** Condiciones iniciales y de borde, parámetros de los modelos incluidos.

Los datos necesarios descritos en los cuatro primeros puntos están disponibles en principio en el SIIR, faltando la información referente a los costos del tratamiento, pero estos son utilizados sólo por uno de los modelos con que cuenta el WaterWare. Sin embargo, es necesario verificar la compatibilidad de las distintas bases de datos necesarias. Este también es un software comercial.

2.3.5.- BASINS

BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) es un sistema de análisis multipropósito desarrollado por la Oficina de Aguas de la U.S. Environmental Protection Agency's (EPA's) que permite realizar análisis de calidad de aguas a distintos niveles (desde cuencas a tramos de ríos). Se encuentra disponible para ser descargado en la página <http://www.epa.gov/waterscience/basins/>.

Este sistema combina variadas bases de datos, modelos, herramientas de evaluación, programas utilitarios de pre y post-procesamiento, y software generador de reportes. El sistema está desarrollado para funcionar en un ambiente SIG, específicamente el ArcView 3.2. Las bases de datos que necesitan los distintos modelos se generan por el SIG y se entregan directamente a los modelos, los cuales se ejecutan en ambiente DOS o Windows.

El sistema BASINS incorpora los siguientes modelos:

- **QUAL2E**, que es un modelo de calidad de agua y eutrofización.

- **WinHSPF**, que es una interfaz visual para el HSPF versión 12 (Donigian e Imhoff, 2002), programa de simulación hidrológica basado en el Stanford Watershed Model (SWM) (Crawford y Linsley, 1962).
- **SWAT**, que es un modelo a escala de cuencas desarrollado para predecir los impactos del uso de suelos en los cuerpos de agua.
- **PLOAD**, que es un modelo que estima las fuentes de polución difusas.

Las bases de datos integradas al sistema BASINS son:

Datos Cartográficos		
Producto	Fuente	Descripción
Límite de unidades hidrológicas	U.S. Geological Survey (USGS)	Delineación de los límites de las cuencas de los ríos principales de EEUU
Caminos principales	Federal Highway Administration	Red de carreteras interestatales y estatales
Centros poblados	USGS	Localización y nombre de centros poblados
Áreas urbanas	Bureau of the Census	Delineación de las áreas pobladas mayores
Límites de condados	USGS	Límites Administrativos
Regiones de EPA	USGS	Límites Administrativos
Datos Ambientales		
Producto	Fuente	Descripción
Regiones ecológicas Nivel III	U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)	Ecoregiones y sus límites
National Water Quality Assessment (NAWQA) Límites de áreas de estudio	USGS	Delineación de áreas de estudio
1996 Inventario de necesidades de agua Limpia	USEPA	Necesidades de tratamiento de aguas residuales ordenadas por estado
Base de datos de suelo estatales (STATSGO)	U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS)	Información de suelos
Áreas con Manejo estatal	University of California, Santa Barbara	Terrenos federales e indígenas
Cauces Version 1 (RF1)	USEPA	Red de cauces (1:500K)
Reach File Version 3 (RF3) Alpha	USEPA	Red de cauces (1:100K), versión alpha
Red hidrográfica nacional	USGS	Red de cauces basada en la RF3, más detallada e incluye características del agua superficial
Modelos digitales de elevación (DEM)	USGS	Mapas topográficos, permiten delineación de cuencas
Uso de suelos	USGS	Límites asociados a distintos usos de suelo
Inventario Nacional de embalses	U.S. Army Corps of Engineers and the Federal Emergency Management Agency	Localización e información de las represas existentes en los EEUU
Datos de Monitoreo Ambiental		
Producto	Fuente	Descripción

Water Quality Monitoring Stations and Data Summaries	USEPA	Sumarios estadísticos del monitoreo de calidad de agua relacionados a parámetros físicos y químicos, calculados por estación en intervalos de 5 años entre 1970 y 1994, y cada 3 años entre 1995 y 1997
Estaciones de monitoreo bacterial	USEPA	Sumarios estadísticos del monitoreo de bacterias, calculados por estación en intervalos de 5 años entre 1970 y 1994, y cada 3 años entre 1995 y 1997
Datos y estaciones de control de calidad	USEPA	Datos de niveles de calidad observados para ubicaciones y parámetros seleccionados.
Inventario Nacional de sedimentos (NSI) Estaciones y datos	USEPA	Química de sedimentos, residuos de papel, y abundancia béntica de sedimentos de zonas de agua dulce y costeros.
Inventario de Pesca y vida natural	USEPA	Reporte de estado de lugares de pesca, incluyendo tipo de debilitación.
Estaciones fluviométricas	USEPA	Inventario de las estaciones de agua superficial incluyendo el flujo medio y mínimo mensual de 7Q10
Estaciones Climatológicas	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	Localización de las estaciones meteorológicas de primer orden de la NOAA
Fuentes de agua potable	USEPA	Localización de las fuentes de agua potable y sus fuentes
Estaciones fluviométricas de la cuenca y datos	NOAA	Localización de estaciones meteorológicas y su información de monitoreo asociadas
Areas de cultivo de mariscos	NOAA	Localización y extensión de las áreas de protección de crustáceos

Las herramientas de evaluación incorporadas a BASINS son:

- **TARGET**, integra y procesa gran cantidad de información de múltiples elementos dentro de un área de estudio y presenta un resumen del área completa que permite al usuario obtener conclusiones preliminares sobre los datos ambientales. Esta herramienta fue diseñada para realizar análisis regionales.
- **ASSESS**, realiza un análisis de estaciones de monitoreo específicas y su proximidad a cuerpos de agua, lo cual facilita la tarea de seleccionar los cuerpos de agua que requieren de un análisis más detallado. Esta herramienta fue desarrollada para realizar análisis a nivel de cuencas.
- **Data Mining**, permite unir dinámicamente diferentes datos, lo que permite analizar datos históricos y geográficos simultáneamente. Esta herramienta fue desarrollada para realizar análisis detallados.

Las utilidades de pre y post-procesamiento incluidas en BASINS son:

- **Theme Manager**, permite al usuario agregar o eliminar fácilmente datos auxiliares que no son utilizados por otros componentes de BASINS.
- **Import Tool**, permite importar datos en un formato que pueda ser utilizados por los componentes de BASINS. Estos pueden ser datos desarrollados localmente los cuales son más detallados que los que posee BASINS.
- **Download Tool**, permite bajar la National Hydrographic Dataset (NHD) desde el sitio ftp del USGS.
- **Grid Projector**, permite convertir datos desde coordenadas geográficas (latitud, longitud) a múltiples sistemas de coordenadas cartesianas (pies, metros, etc.).
- **GenScn**, es un post-procesador que permite mostrar e interpretar los datos entregados por los modelos HSPF y SWAT.
- **WDMUtil**, permite manejar los archivos Watershed Data Management (WDM), que son con los que trabaja el programa HSPF.
- **Manual Delineation Tool**, permite subdividir manualmente las cuencas en subcuencas y generar redes de cauces basado en la topografía.
- **Automatic Delineation Tool**, permite subdividir automáticamente las cuencas en subcuencas basado en ciertos parámetros entregados por el usuario.
- **Predefined Delineation Tool**, permite importar subcuencas creadas previamente.
- **Land Use, Soil Classification, and Overlay**, permite importar datos sobre uso y tipo de suelo para una cuenca o subcuenca y crear elementos con combinaciones uso/suelo diferentes.
- **Land Use Reclassification**, permite al usuario cambiar la clasificación de los suelos.
- **Water Quality Observation Data Management**, permite manipular la información de calidad de agua observada (agregar o quitar estaciones de monitoreo, y agregar o modificar los datos de estas).
- **DEM Reclassification**, permite al usuario modificar el nivel de detalle de la clasificación del modelo de elevación digital (Digital Elevation Model, DEM), realizar una clasificación no uniforme para determinar las características topográficas claves de la cuenca, etc.
- **Lookup Tables**, entregan al usuario un acceso rápido a información relevante de referencia de los productos incorporados en BASINS.

Los reportes generados por BASINS son:

- *Inventarios puntuales*
- *Síntesis de la calidad del agua*
- *Emisiones tóxicas en el aire*
- *Uso del suelo*
- *Distribución de uso de suelo (Grid)*
- *Características de suelo a nivel del Estado*
- *Cuencas topográficas*
- *Informe de cuencas topográficas (Grid)*

Este modelo está diseñado para utilizar las bases de datos con que cuentan las agencias estatales de los Estados Unidos. La información necesaria para generar estas bases de datos en Chile en su mayoría está disponible tanto en el SIIR como en el SIGIRH de la DGA o en la DGOP del MOPTT. Se requiere sin embargo asegurar la compatibilidad de la información proveniente de diferentes fuentes. A continuación se detallan los datos necesarios y su posible disponibilidad en Chile:

Base de datos en EE.UU.	Disponibilidad en Chile
Límite de unidades hidrológicas	Cuencas (SIIR, SIGIRH)
Caminos principales	
Centros poblados	
Áreas urbanas	
Límites de condados	División Político-Administrativa (SIIR)
Regiones de EPA	División Político-Administrativa (SIIR)
Regiones ecológicas Nivel III	Áreas protegidas o de restricción (SIIR)
National Water Quality Assessment (NAWQA) Límites de áreas de estudio	
1996 Inventario de necesidades de agua Limpia	
Base de datos de suelo estatales (STATSGO)	Clasificación y uso de suelos (SIIR)
Cauces Version 1 (RF1)	Cauces Naturales y canales e infraestructura de riego (SIIR)
Reach File Version 3 (RF3) Alpha	Cauces Naturales y canales e infraestructura de riego (SIIR)
Red hidrográfica nacional	Cauces Naturales y canales e infraestructura de riego (SIIR)
Modelos digitales de elevación (DEM)	DGOP 2002
Uso de suelos	Uso de suelos (SIIR, SAG, CIREN)
Inventario Nacional de embalses	Canales e Infraestructura de riego (SIIR)
Water Quality Monitoring Stations and Data Summaries	Calidad de Aguas (SIIR, DGA)
Estaciones de monitoreo bacterial	
Datos y estaciones de control de calidad	Calidad de Aguas (SIIR, DGA)
Inventario Nacional de sedimentos (NSI) Estaciones y datos	
Inventario de Pesca y vida natural	
Estaciones fluviométricas	Estaciones pluviométricas (SIIR, DGA)
Estaciones Climatológicas	
Fuentes de agua potable	
Estaciones fluviométricas de la cuenca y datos	
Áreas de cultivo de mariscos	

La información disponible debe ser modificada para presentar los mismos que poseen las bases de datos con que cuenta BASINS, además de tener que adaptar ciertos campos a la realidad nacional (e.g. regiones EPA, regiones ecológicas nivel III, etc.).

Por otro lado es necesario considerar que estos datos pueden ser necesarios sólo para alguno de los modelos con que cuenta BASINS. El modelo de simulación de caudales de cuencas, está basado en el Stanford Watershed Model que es un modelo bastante general, pero requiere de información horaria de lluvias y otros datos meteorológicos para los casos de cuencas nivales.

2.3.6.- Reflexiones sobre los modelos revisados

En general, los modelos revisados son de aplicación general y por consiguiente en principio son posibles de utilizar en cuencas de Chile. No obstante, es conveniente tener presente lo siguiente con respecto a cualquiera de ellos. Un modelo es una representación matemática simplificada de la realidad y por consiguiente refleja o reproduce el comportamiento de la realidad en forma parcial, ya que el prototipo es siempre más complejo.

A medida que avanza el conocimiento técnico esta representación es más completa, pero siempre permanece como una idealización simplificada. Por ello, su aplicación está condicionada por aquellos elementos o procesos que la representación incluye, de manera que al usarla en otras condiciones uno debe asegurarse que las propiedades más significativas, del fenómeno a estudiar o analizar, estén incluidas en la concepción del modelo.

En segundo lugar, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta la complejidad del modelo, su aplicación requiere mayor tiempo para lograr el conocimiento y la experiencia necesaria para poder usar el modelo. Este esfuerzo se compensa con la posibilidad de tener una mejor representación de la realidad.

En tercer lugar, se debe tener en cuenta la calidad y cantidad de información de entrada que necesita el modelo. Se debe contar con información adecuada, de buena calidad, precisa, compatible y representativa del fenómeno que se quiere analizar o simular. Un buen modelo alimentado con una información mediocre no producirá mas que un mal resultado.

Contar con una información inicial de calidad es un proceso caro que toma bastante tiempo. En estos casos, es frecuente que se obtengan resultados más representativos con modelos simples que no necesitan tanto tiempo para entrenamiento en su uso y que requieren una información menos detallada.

2.4.- El Modelo MAGIC y el modelo MPL

Se obtuvo y estudió la documentación del modelo MAGIC para conocer su funcionamiento, sus tablas de datos, los procesos que considera, los resultados que entrega, las posibilidades de otras componentes, potencialidades y limitaciones del mismo.

La información sobre la documentación del modelo MAGIC fue proporcionada por la contraparte de este estudio, Departamento de Estudios y Planificación de DGA. Dicha información consistió en un documento con la descripción detallada de las 43 Tablas de Datos de entrada, otro documento con las Tablas de Resultados de la operación de los objetos del modelo, es decir, embalses, acuíferos, zonas de riego, etc., y un tercer documento relativo a los procedimientos empleados para simular los objetos y la forma de efectuar la operación del sistema de recursos hídricos por modelar. Todos los documentos corresponden a los Manuales de Usuario y Manual Técnico del Modelo MAGIC, versión preliminar aún no editada.

Para conocer mejor el funcionamiento del modelo MAGIC se tuvo una serie de reuniones con la DGA, donde se efectuó una presentación del modelo en operación aplicado al valle del río Aconcagua y se fueron aclarando dudas sobre la definición y funcionalidad de los objetos que maneja MAGIC.

Respecto a los elementos u objetos incluidos en el modelo MAGIC y a la representación de los procesos hidrológicos involucrados, cabe señalar que MAGIC tomó el concepto de cuenca y el código fuente del estudio "DGA, 1997. "Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Maule, VII Región". Informe Final y Manual de Uso. Desarrollado por CONIC-BF. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile" y los fundió con el concepto y la forma de funcionamiento de los acuíferos, zonas de riego y embalses del estudio "DOH, 1998. "Modelo de Simulación Hidrológico Valle del Río Aconcagua". Tomo II, Anexo I y Manuales de Uso. Desarrollado por INGENDESA con la asesoría de AC Ingenieros Consultores Ltda. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile". Además, se definió una estructura de variables completamente nueva y una interfaz de usuario superior a la del modelo del estudio "DGA, 2000. "Complemento Diseño Modelación Hidrológica". Dirección General de Aguas y Universidad de Concepción, Santiago, Chile", lo cual dio origen a un código fuente completamente nuevo que incorporara todos los elementos mencionados anteriormente, utilizando el lenguaje de programación Delphi 7.0.

2.4.1 El Modelo MAGIC

Para realizar la simulación del balance hídrico en una cuenca, MAGIC utiliza 12 objetos, cuyos atributos que lo definen o parámetros que permiten caracterizarlos, se ingresan manualmente en una base de datos ACCESS que contiene una o más tablas para cada objeto y la topología de la red de simulación, también construida a mano.

De estos 12 objetos, tres de ellos son bastante complejos por los múltiples caudales de entrada y salida. El resto son conectores simples.

a) Acuíferos (AC)

El diagrama 1 siguiente, presenta las entradas y salidas de este tipo de objeto (pg. 155, Anexo 2).

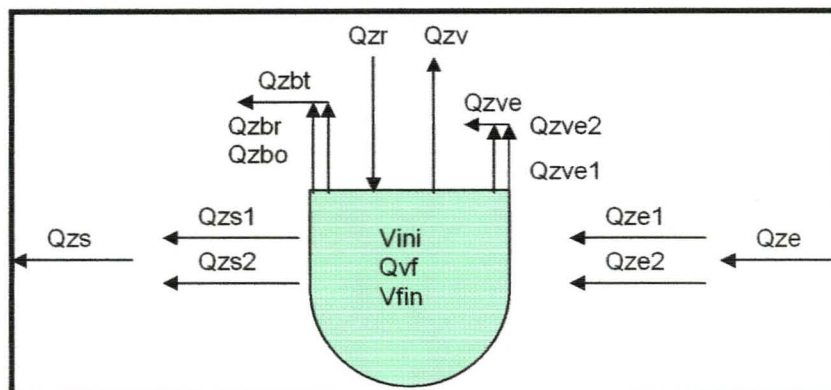


Diagrama 1: Caudales de Entrada y Salida de un Acuífero

b) Embalses (EM)

El diagrama 1 siguiente, presenta las entradas y salidas de este tipo de objeto (pg. 158, Anexo 2). Este objeto funciona como Nodo y Embalse y puede entregar caudal a 20 objetos.

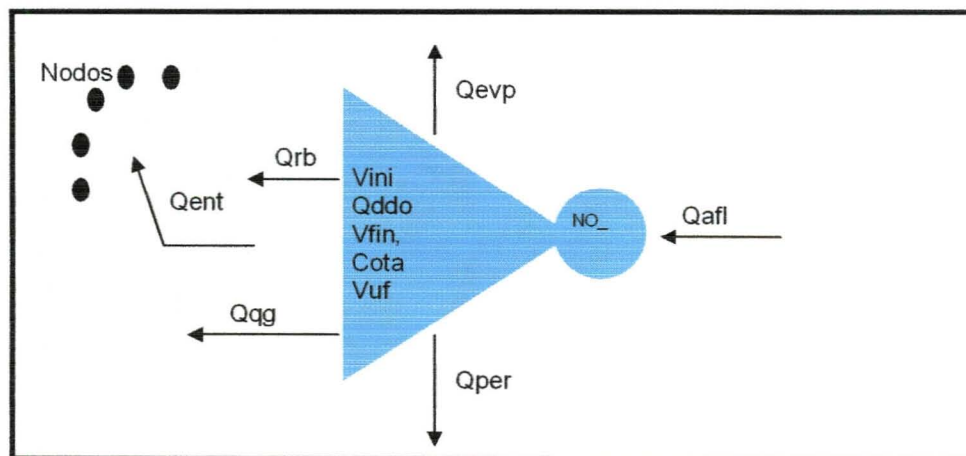


Diagrama 2: Caudales de Entrada y Salida de un Embalse

c) Zona de Riego (ZR)

De los objetos que maneja MAGIC, la Zona de Riego es el más complejo, tanto por los caudales de entrada y salida como por la cantidad de información previa que es necesario manejar para su correcta caracterización. El diagrama 3, presenta los flujos de entrada y salida para este objeto (pg. 160, Anexo 2).

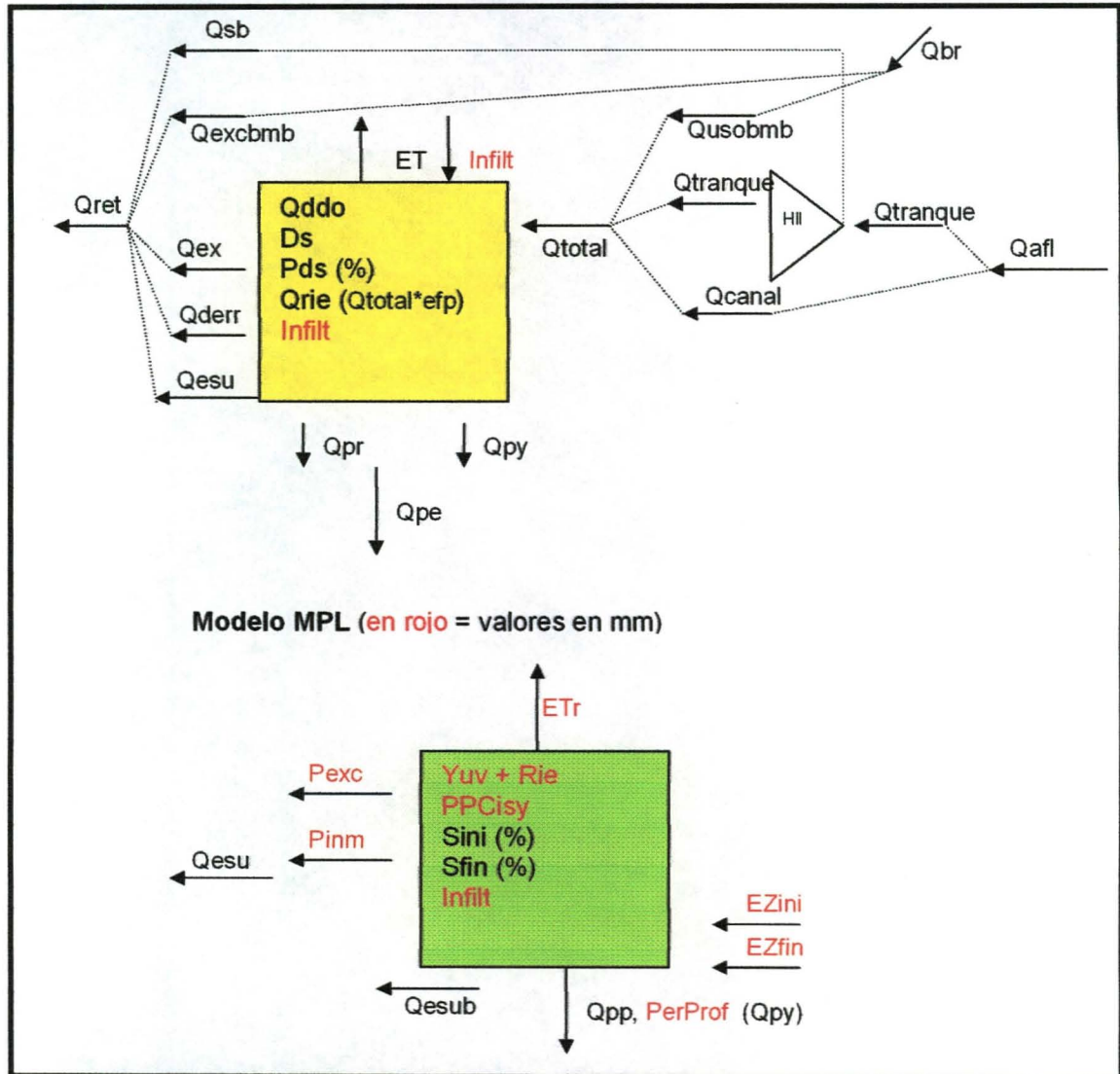


Diagrama 3: Zona de Riego: Balance de masa y modelo MPL

d) Canal Matriz (CA)

Corresponde a uno o más segmentos de arcos utilizado para distribuir agua a una zona de riego. El diagrama 4 presenta los caudales de entrada y salida para este objeto. Se caracteriza el segmento por eficiencia.

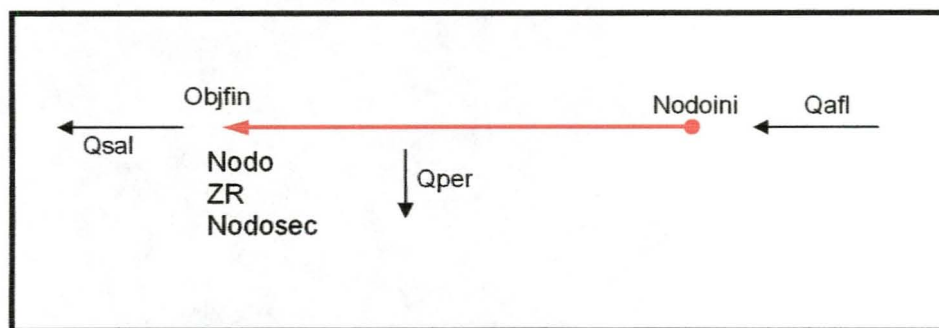


Diagrama 4: Elementos de un Canal Matriz

e) Canal Derivado (DR)

Es similar a la configuración de un canal matriz pero, su nodo final siempre será una zona de riego (ZR) y su nodo inicial, un nodo secundario.

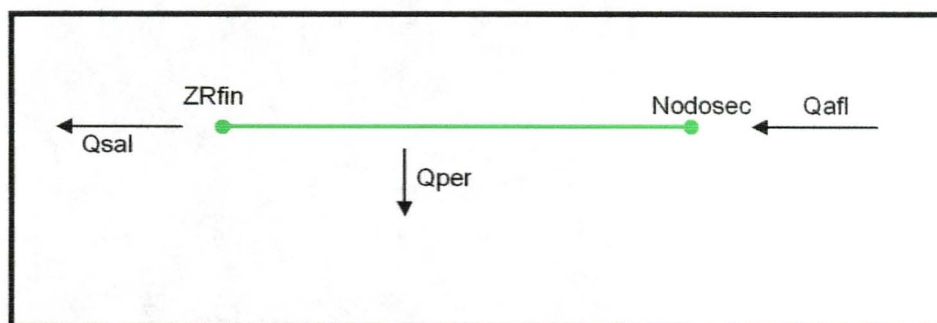


Diagrama 5: Elementos de un Canal Derivado

f) Tramo de Río (TR)

Tiene la misma configuración de los canales pero sus nodos de inicio y fin son de tipo general. Topológicamente, tiene un conector especial hacia el acuífero subyacente.

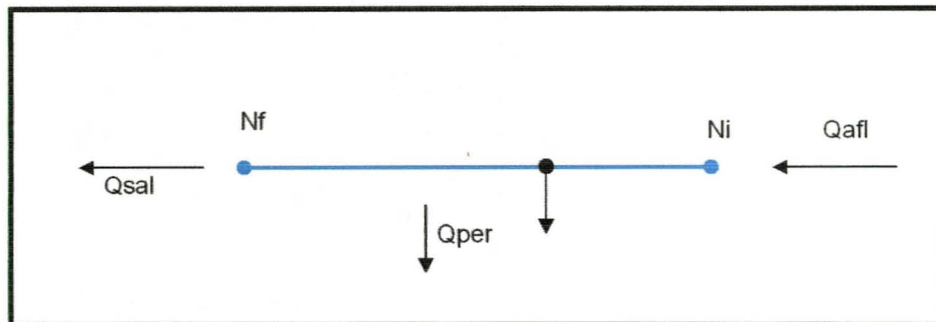


Diagrama 6: Elementos de un Tramo de Río

g) Nodo General (NO)

Es un elemento de conexión entre objetos donde existe un objeto que aporta un caudal mensual, ya sea permanente o eventual y un objeto que recibe este caudal. Tiene asociado los caudales mensuales. Los aportes pueden provenir de tramos de río, aportes naturales, hoyas intermedias, canales matrices, canal derivado, centrales hidroeléctricas, embalse, derrames, etc.

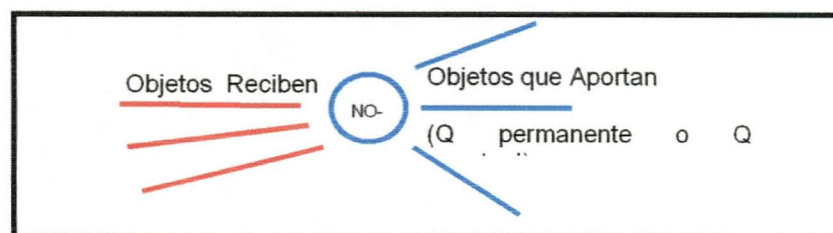


Diagrama 7: Elementos de un Nodo de tipo general

h) Pozo

Conector especial que representa el caudal extraído de un acuífero por bombeo y que llega a una Zona de Riego.

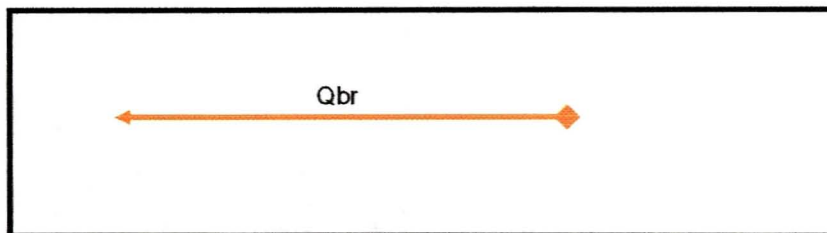


Diagrama 8: Elementos de un Nodo de tipo general

i) Aporte Natural (AN), Hoyas Intermedias (HI)

Nodo especial que representa el caudal de entrada a sistema desde una o más cuencas aportantes.

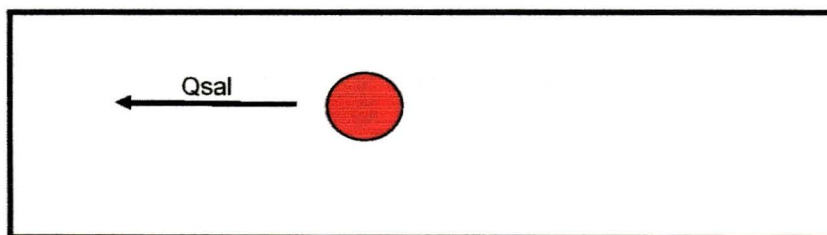


Diagrama 9: Elementos de un Nodo de tipo general

j) Nodo Secundario (NO)

Nodo especial que permite distribuir el caudal de un canal a un canal derivado.

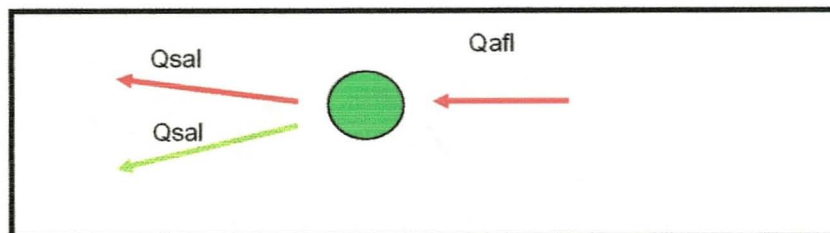


Diagrama 10: Elementos de un Nodo de tipo general

k) Captación Puntual (CP)

Nodo especial que permite extraer caudal de un tramo de río y este caudal **sale** de la cuenca. El caudal realmente extraído se compara con el caudal demandado por lo tanto se le podría asignar un porcentaje de satisfacción de la demanda. Los caudales extraídos varían mes a mes y año a año.

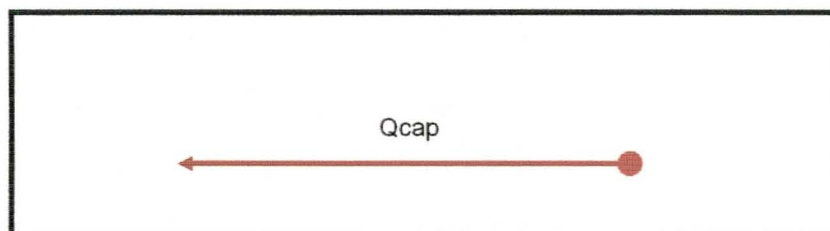


Diagrama 11: Elementos de una Captación Puntual

l) Descarga Puntual (DE)

Nodo especial que permite agregar un caudal mensual a otro objeto. La tabla de caudal asociada tiene una sola fila y columnas para los 12 meses.

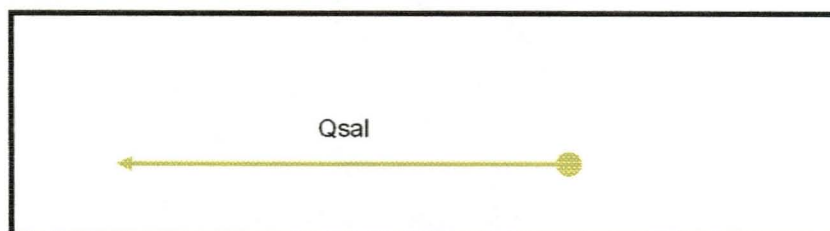


Diagrama 12: Elementos de una Descarga Puntual

Estos 12 objetos permiten construir la red de modelamiento de la cuenca y cada vez que se usa uno de ellos, se debe llenar la tabla de entrada con los parámetros que definen a dicho objeto y los caudales asociados, cuando corresponda.

El Diagrama 13 muestra un ejemplo de cómo se va formando la red. Cada objeto tiene un código único formado por un número correlativo y un par de letras que indican de qué objeto se trata (por ejemplo, AN-, aporte natural y si existen 6 de estos objetos, aparecerá en la red como AN-01, AN-02 AN-06).

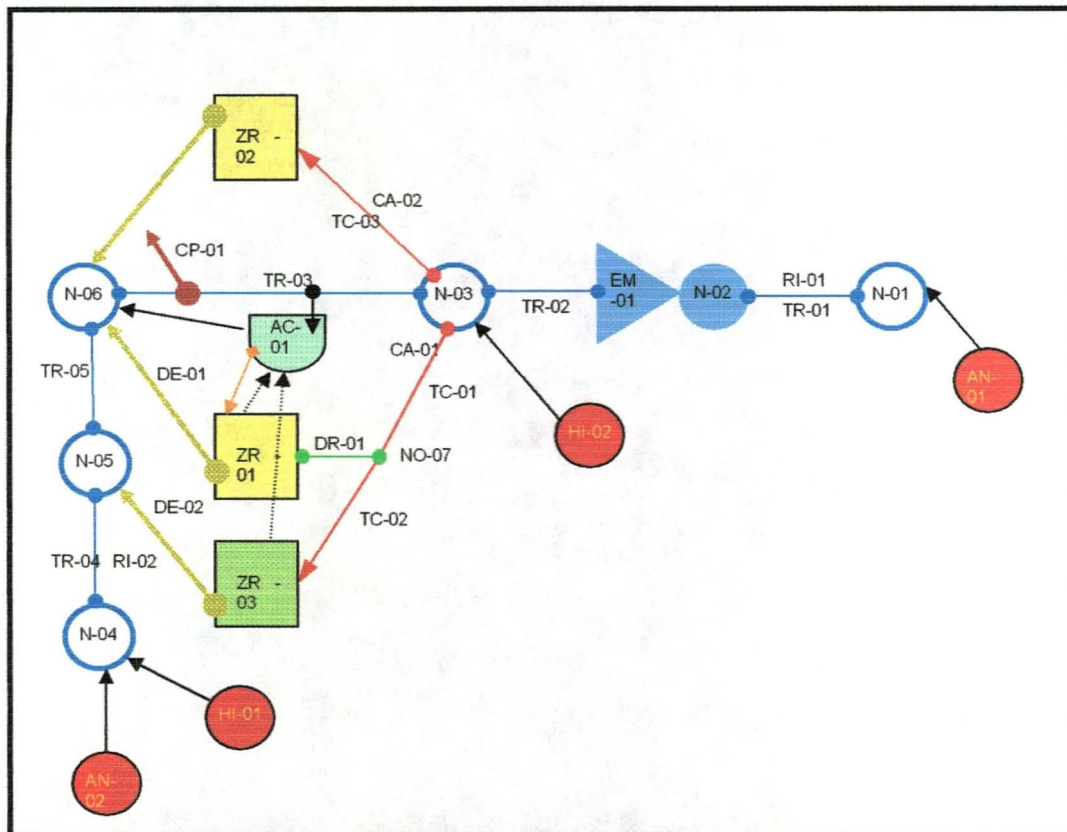


Diagrama 13: Ejemplo de Red de Modelación para MAGIC

Como se mencionó anteriormente, cada uno de estos objetos tiene asociado una o más tablas en la base de datos de entrada y genera una o más archivos de textos como resultado de la modelación.

Un aspecto importante es la comprobación topológica de la red de modelamiento y que se cumplan las restricciones de conexión asociadas a los objetos. Este punto es uno de los beneficios de la interfaz construida. La interfaz, objeto de este estudio, es capaz de generar esta red de modelamiento, georreferenciada, desde cero e ir controlando la topología y le permite al usuario ingresar los atributos de cada objeto a la base ACCES de entrada.

2.4.1.1.- Tablas descriptivas de los Datos de Entrada del Modelo Magic

A continuación se presenta una lista de las Tablas de Datos de Entrada del Modelo Magic. La descripción detallada se incluye en **Anexo 1**.

Nº	Nombre	Descripción
1	AC_PARAM	Parámetros topológicos de Acuíferos
2	AC_QZS	Caudales Subterráneos de Salida
3	AC_QZV	Caudales de Afloramiento a la Salida
4	AC_QZVE	Caudal Afloramiento a la Entrada
5	AN_PARAM	Parámetros topológicos de Aportes Naturales
6	CA_DER	Topología de Canales Derivados
7	CA_PARAM	Característica de los Tramos de Canal
8	CA_TRAMOS	Topología de Tramos de Canal
9	CH_PARAM	Parámetros topológicos de Centrales Hidroeléctricas
10	CH_QMAX	Caudales máximos mensuales de abastecimiento
11	CP_PARAM	Caudales mensuales de una Captación Puntual
12	CULT_TIPOS	Tipos de Cultivos en Zona de Riego (no se usa)
13	DP_PARAM	Caudales mensuales de una Descarga Puntual
14	EM_CA	Volúmenes mensuales de Alerta en un Embalse
15	EM_DEMGE	Caudal mensual interno para Generación de E.E.
16	EM_FV	Factores ecuación de volumen del Embalse
17	EM_NODOS	Nodos que demandan caudal al embalse (hasta 20)
18	EM_PARAM	Características del Embalse
19	EM_QGENMAX	Caudal mensual demandado para Generación de E.E.
20	EM_QV	Factores ecuación de caudal del Embalse
21	EM_SALIDAS	Topología y Caudales máximos de entrega
22	EM_SVH	Fracciones de percolación, filtración y evaporación
23	EM_TASEV	Tasa de Evaporación mensual del Embalse
24	ESTAD_PP	Estadísticas de Precipitación
25	ESTAD_Q	Estadísticas de Caudales medidos
26	HI_PARAM	Parámetros topológicos de Hoyas Intermedias
27	MR_TIPOS	Factores por método de riego (no se usa)
28	NO_DIST	Distribución de Derechos (%) a partir de un Nodo
29	NO_PARAM	Caudales Mensuales mínimos en un nodo
30	PO_PARAM	Parámetros topológicos de Pozos (representativo)
31	PO_Q	Caudales mensuales por año de bombeo
32	PO_USOS	Tabla de eficiencias de uso del agua de pozos
33	QE_PARAM	Caudales ecológicos mensuales en un Nodo
34	RI_PARAM	Tabla de Ríos y Códigos asociados
35	RI_TRAMOS	Topología y Características de un tramo de río
36	SECCIONES	Tabla de secciones en una cuenca (no se usa)
37	ZR_CULT_ETP	Vector de Evapotranspiración en una Zona de Riego
38	ZR_CULT_PAR	Características de una Zona de Riego (Z.R.)
39	ZR_CULT_PEF	Tabla de Precipitación Efectiva Mensual libre Z.R.
40	ZR_DERR	Topología y fracción de un derrame en Zona de Riego
41	ZR_NNM	Tabla de Necesidades Netas Mensuales en Zona R.
42	ZR_PARAM	Características de una Zona de Riego
43	ZR_SR	Tabla de Caudales Mensuales que Caracterizan a Z.R.

Dada la enorme extensión de la descripción detallada de estas tablas, se ha incluido en el **Anexo 1**, el documento oficial de la DGA en el cual se explica los campos contenidas en cada una de ellas.

2.4.1.2.- Simulación del Sistema en el Modelo Magic

El primer paso de la simulación consiste en crear un nuevo escenario y leer la base de datos que contiene toda la información recopilada para la cuenca. Posteriormente, es necesario caracterizar el escenario que se desea modelar, definiendo el período temporal, especificando si la entrega de caudal en los nodos debe ser restringida a la demanda o a la capacidad de los objetos que reciben el caudal, si el bombeo de los pozos corresponderá al bombeo impuesto en los datos de entrada o se bombeará sólo hasta satisfacer el déficit de caudal -no suplido por los aportes superficiales- del objeto de destino, y si el caudal de recarga que pueden recibir los acuíferos debe restringirse al comienzo del mes al volumen máximo de dichos acuíferos, o bien, se debe recibir toda la recarga posible, realizar el balance de caudales y luego calcular el caudal de afloramiento de dichos acuíferos.

La simulación de los flujos que circulan en la cuenca se lleva a cabo desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada uno de los nodos que definen los ríos del sistema. y se ilustra en las figuras 4 y 5.

Figura 4 : Diagrama de Flujo del Proceso de Simulación utilizado en MAGIC v1.0

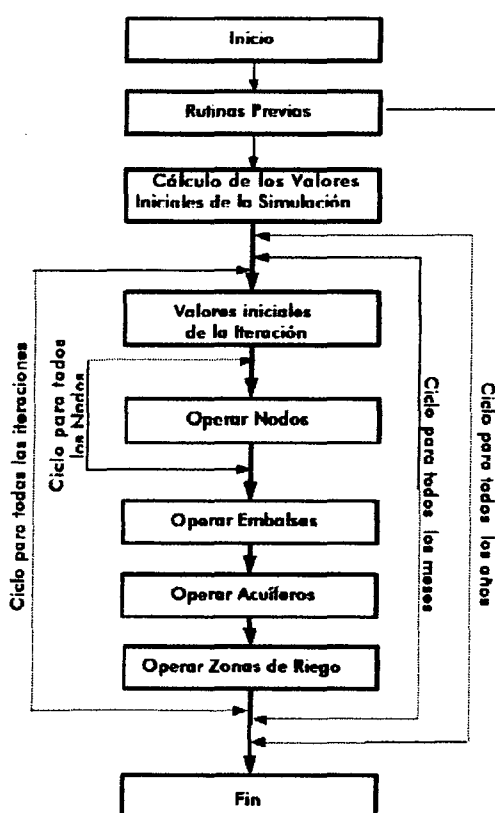
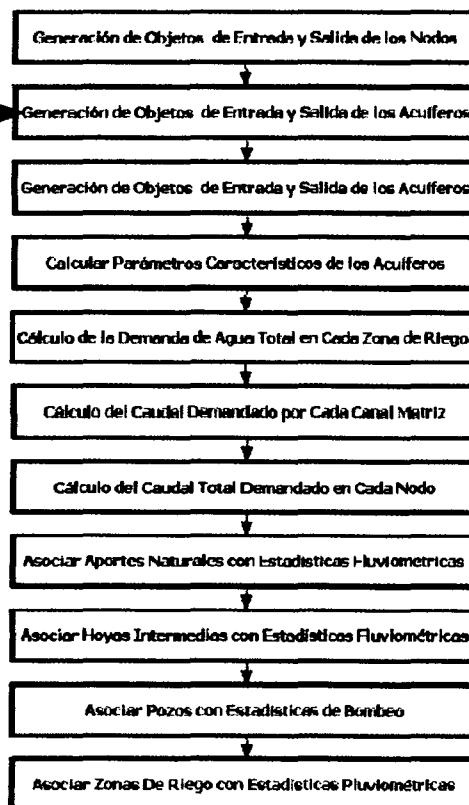


Figura 5: Diagrama de Flujo de las Rutinas Previas del proceso de Simulación



MAGIC v1.0 realiza un ciclo para todos los meses del período de simulación, y dentro de este efectúa otro ciclo de iteraciones para calcular todos los caudales de entrada y salida en todos los nodos del sistema. En una primera iteración se calcula en cada nodo el caudal afluente producto de los aportes de cuencas cabeceras u hoyas intermedias (para los nodos cabecera), de los tramos de río (para los nodos intermedios), de las descargas puntuales existentes, y los tramos de canal. En esta primera iteración no se consideran las entregas de los embalses, de los acuíferos ni los derrames de las zonas de riego, pues todavía no han sido operados dichos objetos. Al finalizar esta primera iteración para todos los nodos del sistema, se operan los embalses y se calculan sus entregas para riego e hidroelectricidad, se operan los acuíferos y se calculan sus afloramientos y caudales efectivamente bombeados hacia el sistema superficial y se operan las zonas de riego, calculando sus derrames y percolaciones al sistema subterráneo. En las iteraciones posteriores, el cálculo del caudal afluente a los nodos se hace conociendo todos los caudales involucrados, incluso las entregas de los embalses, de los acuíferos y los derrames de las zonas de riego calculados al final de la iteración anterior. El modelo sigue iterando dentro del ciclo mensual hasta asegurar que los caudales de salida de las zonas de riego, embalses y acuíferos coincidan con los correspondientes caudales afluentes a los nodos del sistema.

En cada iteración, dentro del ciclo mensual, el caudal total afluente a cada nodo se reparte de acuerdo al porcentaje que tenga asignado cada uno de los objetos que reciben caudal desde dicho nodo. Esta característica puede ser utilizada, por ejemplo, para simular la asignación de caudal en un determinado nodo de acuerdo al porcentaje de derechos permanentes y eventuales existentes en dicho nodo.

2.4.1.3.- Tablas descriptivas de los Resultados del Modelo Magic

A continuación se presenta una lista de las variables de salida asociadas a los objetos o componentes de MAGIC. La descripción detallada se incluye en Anexo 2.

Tabla 3 : Salidas para cada uno de los objetos soportados por MAGIC v1.0

Nº	Objeto	Salidas
1	Acuíferos	Volumen de agua al inicio y fin de mes, caudal afluente subterráneo, de recarga producto de la percolación de objetos superficiales, de bombeo para riego y otros usos, de afloramiento, de salida subterránea.
2	Canales Derivados	Caudal afluente, de percolación y de salida.
3	Aportes Naturales	No tienen salidas. Sólo se utilizan como datos de entrada.
4	Tramos de un Canal Matriz	Caudal afluente, de percolación y de salida.
5	Centrales Hidroeléctricas	Caudal demandado, afluente y energía generada.
6	Captaciones Puntuales	Caudal mensual captado.
7	Descargas Puntuales	Caudal mensual descargado.
8	Embalses	Volumen bruto almacenado al inicio y fin de mes, volumen útil al final del mes, cota al final del mes, caudal demandado para energía, demandado para riego, afluente, de entrega para energía, de entrega para riego, de rebase, de filtración, de evaporación y de percolación
9	Estadísticas pluviométricas	No tienen salidas. Sólo se utilizan como datos de entrada.
10	Estadísticas fluviométricas	No tienen salidas. Sólo se utilizan como datos de entrada.
11	Hoyas Intermedias	No tienen salidas. Sólo se utilizan como datos de entrada.
12	Nodos	Caudal afluente, de salida y demandado
13	Pozos	Caudal bombeado mensual.
14	Caudales Ecológicos	Porcentaje de cumplimiento del caudal ecológico establecido para cada nodo.
15	Tramos de Río	Caudal afluente, de percolación y de salida.
16	Zonas de Riego	Grado de saturación al inicio y fin de mes, precipitación inmediata, precipitación en exceso, infiltración, evapotranspiración, percolación profunda, caudal demandado, afluente, bombeado para riego, aportado por el tranque de regulación nocturna, total utilizado para riego, de percolación debida al riego, de percolación debida a la lluvia, de retorno superficial y porcentaje de satisfacción de la demanda.

Igual que el caso de las tablas de entrada, se ha incluido en el Anexo 2, el documento oficial de la DGA, en su versión preliminar ya que faltan dos tablas.

2.4.2.- Modelo MPL

Determinar una estadística de caudales mensuales de por lo menos 30 años, en ríos ubicados en cuencas sin control fluviométrico o con información de caudales insuficiente, constituye un problema frecuente pero difícil de abordar.

Una manera de cuantificar los caudales, es mediante la simulación hidrológica de los distintos procesos del ciclo de escorrentía en una cuenca. Para ello se utilizan ecuaciones matemáticas que describen los procesos involucrados, tales como infiltración, percolación profunda, escorrentía subterránea y almacenamiento.

La síntesis de los caudales medios mensuales se realiza mediante un programa que simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad o balance hidrológico sobre un elemento de área o volumen de control de la cuenca.

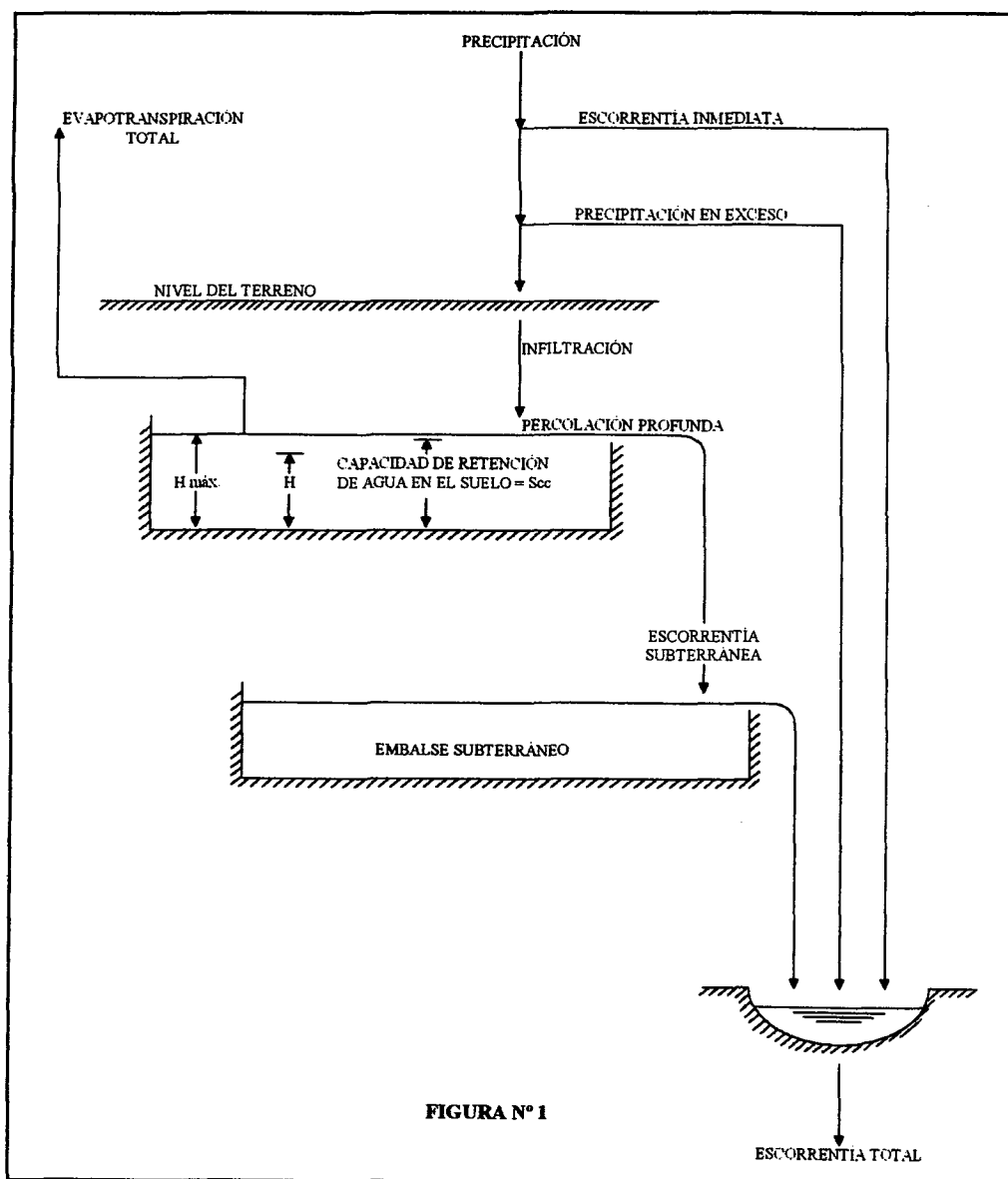
Dicho modelo utiliza como datos la precipitación y evapotranspiración mensual sobre la cuenca y un conjunto de parámetros que permiten calcular, en las expresiones matemáticas usadas, las variables cuyo valor exacto se desconoce.

El modelo MAGIC utiliza el modelo de Precipitación – Escorrentía denominado MPL en dos formas. La primera, en forma indirecta a través de los datos correspondientes a las estadísticas de caudales medios mensuales de cuencas hidrológicas aportantes de régimen de tipo pluvial que no poseen control fluviométrico, para las cuales sus caudales han sido estimados previamente mediante la aplicación del modelo MPL con un juego de parámetros resultante de un proceso de calibración en una cuenca controlada.

La segunda forma es directa pues en la simulación de los sectores de riego se incorporó la rutina del modelo MPL que efectúa la simulación de la escorrentía e infiltración de la lluvia, ello con el propósito de contemplar la escorrentía y la percolación profunda provocadas por la lluvia sobre dichos sectores de riego.

2.4.2.1 Base conceptual del modelo MPL

En la Figura 1 se presenta un esquema conceptual del modelo hidrológico donde se han considerado todos los elementos de embalse y los flujos de agua posibles.



El modelo considera que existen dos elementos de embalse:

- Un volumen de almacenamiento cercano a la superficie del suelo, cuya magnitud representa la capacidad media de retención de agua en la cuenca y desde el cual se extrae agua para satisfacer la demanda de evapotranspiración.
- La cantidad de agua almacenada en esta capa representa la humedad del suelo y se ha expresado como lámina de agua.
- Un volumen subterráneo que retiene el agua que percola y que al vaciarse en forma lenta contribuye al escurrimiento subsuperficial y subterráneo, y que es el que produce la escorrentía en los períodos de estiaje.

El modelo usa la ecuación de continuidad aplicada sobre un área unitaria en la zona no saturada del suelo:

$$I - O = \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

donde:

- I : flujo de entrada al volumen de control e igual a la tasa de infiltración desde la superficie
- O : flujo de salida al volumen de control e igual a la evapotranspiración más la percolación profunda.
- dH/dt: variación en el tiempo de la lámina de agua H almacenada en forma de humedad del suelo.

La lámina de agua almacenada en el suelo en un instante dado, se puede expresar como:

$$H = s \cdot n \cdot D \quad (2)$$

donde:

- D : profundidad total del suelo
- n : porosidad del suelo; cuociente entre el volumen de poros Vp y el volumen total Vt.
- s : grado de saturación del suelo; cuociente entre el volumen de líquido V_l y el volumen de poros Vp.

En igual forma la humedad almacenada en el suelo se puede expresar como:

$$H = s \cdot H_{\max} \quad (3)$$

donde:

H_{\max} : Lámina de agua correspondiente al estado de saturación y es uno de los parámetros del modelo.

De este modo, la ecuación (1) puede expresarse sin dimensiones de la forma:

$$\frac{1}{H_{\max}} (I - 0) = \frac{ds}{dt} \quad (4)$$

a) Estimación de la Infiltración

La tasa de infiltración I queda dada por la expresión:

$$I = \begin{cases} T_p & T_p < f \\ f & T_p > f \end{cases} \quad (5)$$

donde:

f : Capacidad de infiltración del suelo. Se supone que varía en forma lineal con el grado de saturación de acuerdo a la relación:

$$f = FC + ALFA(1 - s) [\text{mm/día}] \quad (6)$$

con $ALFA$ y FC (la capacidad de infiltración del suelo saturado), son parámetros del modelo.

T_p : Intensidad media diaria de las precipitaciones, supuesta constante dentro del mes y evaluada como:

$$T_p = \frac{P}{\text{Días Mes}} [\text{mm/día}] \quad (7)$$

donde:

P : Precipitación mensual
 DíasMes : Número de días del mes adoptando el valor de 30 para todos los meses.

$ALFA$ y FC son parámetros del modelo, que deben ser calibrados, en cambio P son datos de entrada al modelo.

b) Estimación de la Evapotranspiración

La evapotranspiración ET se estima a partir del grado de saturación del suelo, para lo cual se supone una tasa de evapotranspiración igual a la potencial para humedades mayores a SCRIT y una tasa de evapotranspiración decreciente en forma lineal hasta anularse, para una humedad equivalente al punto de marchitez permanente SMIN.

Por lo tanto:

$$ET = \begin{cases} 0 & s < SMIN \\ ETP \cdot \frac{s - SMIN}{SCRIT - SMIN} & SMIN < s < SCRIT \\ ETP & SCRIT < s \end{cases} \quad (8)$$

donde SMIN y SCRIT son parámetros del modelo y ETP son datos de entrada.

c) Estimación de la Percolación Profunda

Para evaluar la percolación profunda PP se supone que ésta ocurre sólo para humedades mayores a un nivel umbral equivalente a la capacidad de campo SCC, y que aumenta en relación cúbica con la humedad, hasta alcanzar en estado de saturación en equilibrio con la tasa de infiltración FC.

$$PP = \begin{cases} 0 & s < SCC \\ FC \cdot \left[\frac{s - SCC}{1 - SCC} \right]^3 & s > SCC \end{cases} \quad (9)$$

Cálculo de la Escorrentía Total

La escorrentía mensual E_{MES} se calcula como la suma de las escorrentías sintetizadas diarias E_{DIA} :

$$E_{MES} = \sum_1^{DiasMes} E_{DIA} [\text{mm/dia}] \quad (10)$$

La escorrentía diaria se calcula como la suma de la escorrentía superficial media diaria E_{SUP} más la escorrentía subterránea E_{SUB} :

$$E_{DIA} = E_{SUP} + E_{SUB} [\text{mm/dia}] \quad (11)$$

e) Cálculo de la Escorrentía Superficial

La escorrentía superficial diaria E_{SUP} se estima igual a la precipitación en exceso más la precipitación inmediata:

$$E_{SUP} = P_{INMEDIATA} + E_{EXCESO} [\text{mm/día}] \quad (12)$$

La precipitación diaria en exceso P_{EXCESO} corresponde a la diferencia entre la intensidad media diaria de la precipitación y la infiltración total en el día.

La precipitación inmediata $P_{INMEDIATA}$ corresponde a una parte de la precipitación total que se manifiesta rápidamente como escorrentía durante la lluvia:

$$P_{INMEDIATA} = P_{MIN} \cdot T_p [\text{mm/día}] \quad (13)$$

donde P_{MIN} es un parámetro del modelo.

f) Cálculo de la Escorrentía Subterránea

Para evaluar la escorrentía subterránea se supone que el embalse subterráneo recibe una recarga constante durante el día, igual a la percolación profunda PP , y que descarga un flujo EZ (escorrentía subterránea) proporcional al volumen embalsado en él.

Aplicando la ecuación de continuidad se tiene:

$$PP - EZ = \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

Dado :

$$EZ = \frac{V}{k} \quad (15)$$

la ecuación anterior se modifica a:

$$PP - EZ = k \frac{dEZ}{dt} \quad (16)$$

Separando variables e integrando, la escorrentía subterránea instantánea vale:

$$EZ(t) = PP + (EZ_0 - PP) e^{-\frac{t}{k}} [\text{mm}] \quad (17)$$

donde:

EZ_0 : Escorrentía subterránea al inicio del día
 k : Constante de tiempo

La escorrentía subterránea al final del día ($t=1$) e inicial del día siguiente EZ_f , vale:

$$EZ_f = PP + (EZ_0 - PP) e^{-\frac{1}{k}} \text{ [mm]} \quad (18)$$

La escorrentía subterránea media diaria es:

$$E_{SUB} = \int_0^1 EZ(t) dt \quad (19)$$

y luego de integrar se llega a:

$$E_{SUB} = PP + k (EZ_0 - PP) (1 - e^{-\frac{1}{k}}) \quad (20)$$

2.4.2.2.- Datos de Entrada al Modelo

Los datos de entrada al modelo son los siguientes:

a) Parámetros

A : Coeficiente que multiplica el dato de lluvia con el fin de obtener la lluvia media sobre la cuenca.
 B : Coeficiente que multiplica el dato de evaporación de bandeja con el fin de obtener la evapotranspiración potencial media sobre la cuenca.
 FC : Tasa de infiltración correspondiente a suelo saturado ($S=1$), en (mm/día).
 $ALFA$: Variación de la tasa de infiltración por unidad de variación del grado de humedad, es decir, $ALFA = -df/ds$.
 $Smin$: Grado de humedad correspondiente al punto de marchitez permanente
 $Scrit$: Grado de humedad crítico bajo el cual la tasa de evapotranspiración real decrece linealmente
 Scc : Grado de humedad correspondiente a capacidad de campo
 $Hmax$: Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado, en (mm)
 K : Constante de tiempo del embalse subterráneo, en (días)
 $Pmin$: Porcentaje de la lluvia que se manifiesta como escorrentía superficial inmediata.
 $AREA$: Área de la cuenca, en km^2

b) Estadística de precipitaciones mensuales

En general se cuenta con valores medidos en alguna estación pluviométrica cercana, de tal forma que estos valores puntuales no tienen porqué coincidir con el promedio espacial a nivel de toda la cuenca. Para considerar este hecho, se corrigen las precipitaciones medidas de la siguiente forma:

$$P = A \cdot PM \quad [\text{mm} / \text{mes}] \quad (21)$$

donde:

P : Precipitación mensual en la zona
PM : Precipitación medida en la estación
A : Coeficiente de precipitación; cuociente entre la precipitación media sobre la cuenca y la precipitación media de la estación base.

c) Datos de evapotranspiración

Al igual que la precipitación, la evapotranspiración medida se corrige de la siguiente forma:

$$ETP = B \cdot EM \quad [\text{mm/mes}] \quad (22)$$

Donde :

ETP : Evapotranspiración potencial mensual
EM : Evaporación medida en el evaporímetro
B : Cuociente entre la evapotranspiración potencial de la cuenca y la evaporación media del evaporímetro.

2.4.2.3.- Metodología de Aplicación

El procedimiento consiste en calcular para cada día del mes, el grado de saturación final SF conocido el grado de saturación al inicio del día SI y los valores diarios de la infiltración, percolación profunda y evapotranspiración:

SF se determina de la ecuación (4) con los valores diarios de I, PP y ET:

$$S_F = S_I + \frac{1}{H_{MAX}} (I - PP - ET) \quad (23)$$

donde:

$$\begin{aligned} I &= I(S_p) \\ PP &= PP(S_p) \\ ET &= ET(S_p) \\ S_p &= \frac{S + S_I}{2} \text{ saturacion media diaria} \end{aligned} \quad (24)$$

con:

$$S = S_I + \frac{1}{H_{MAX}} (I_I - PP_I - ET_I) \quad (25)$$

siendo:

$$\begin{aligned} I_I &= I(S_I) \\ PP_I &= PP(S_I) \\ ET_I &= ET(S_I) \end{aligned} \quad (26)$$

Luego con I , PP y ET se calculan los valores diarios de la escorrentía superficial, escorrentía subterránea y la escorrentía subterránea instantánea al final del día. La escorrentía mensual se obtiene sumando los valores diarios de la escorrentía, tal como se indica en la ecuación (10). El proceso se repite para todos los meses del período de análisis.

2.4.2.4.- Resultados del modelo MPL.

El modelo MPL entrega como resultado una matriz de caudales medios mensuales para el mismo período estadístico de la matriz de datos de lluvias mensuales ingresada como dato.

2.5.- Cartografía Digital e información base

Para el proyecto se recopiló toda la información existente en los sistemas de información geográficos implementados en la CNR y DGA, conocidos como el Sistema de Información Integral de Riego (**SIIR**) y el Sistema Integrado de Gestión de Recursos Hídricos (**SIGIRH**) respectivamente, con información de excelente calidad y muy completa.

La información disponible actualmente para el proyecto esta compuesta de la siguiente información:

2.5.1.- Información Vectorial

Se recopiló y dispone de las siguientes capas de información:

TEMA	ELEMENTO	TOPOLOGIA	FUENTE
Topografía	Puntos altimétricos	Puntos	IGM
Curvas de Nivel	Escala 1:50.000 y 1:10.000	Líneas	IGM, CNR
Hidrología	Ríos, esteros y quebradas	Líneas	IGM, DGA
Hidrología	Cuerpos de agua	Polígonos	IGM
Red de Transporte	Caminos Principales y Secundarios	Líneas	MOPTT - Vialidad
Límites administrativos	Región, Provincia, Comunas y Distritos	Polígonos	IGM
Toponimia	Texto de Anotación	Líneas	IGM
Embalses grandes		Puntos	CNR
Cascos urbanos	Área Construida	Polígono	
Centros poblados	Ciudades, Pueblos y Aldeas	Puntos	INE, MIDEPLAN
Acuíferos		Polígonos	DGA
Agroclima	Temperatura mín y máx, Precipitación media, etc.	Polígonos	CNR
Bocatomas		Puntos	DGA
Canales		Líneas	CNR
Embalses pequeños		Polígonos	CNR
Pozos	Catastros	Puntos	DGA, CNR
Suelos	Serie de Suelo y Capacidad de Uso	Polígonos	CNR
Uso Actual del Suelo en zonas agrícolas	Cultivos	Polígonos	SAG, U. Mayor
Catastro de la Vegetación Nativa de Chile	Vegetación detallada en zonas agrícolas no	Polígonos	CONAMA CONAF
Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas	Polígonos con códigos y nombres	Polígonos	DGA
Estaciones Fluviométrica y Pluviométricas	Código BNA y estadística medida	Puntos	DGA

Para cada capa de información, se dispone de un listado detallado de los campos que contienen.

Toda la información espacial del proyecto, siguiendo las indicaciones del SNIT, fue traspasadas al datum WGS 84 y manejadas en la proyección UTM Huso 19, que es el huso que les corresponde a la V Región y Región Metropolitana.

La razón de manejarlas en proyección UTM y no en coordenadas geográficas, radica principalmente en la facilidad y precisión de los cálculos de distancia, ángulos y pendientes que será necesario realizar.

2.5.2.- Información en Formato Raster

Las capas de información en formato raster consisten en dos tipos de productos:

- a) Imagen ETM del satélite Landsat con un proceso de orto-georreferencia y un píxel de 15 x 15 metros.
- b) Modelo Digital de Elevación (MDE) confeccionado por el programa SRTM (Space Shuttle Topographic Mission) de la NASA y distribuido por el USGS (United State Geological Survey). Este modelo tiene una resolución espacial de 85 x 85 metros pero gran detalle altimétrico.

El MDE realizado por el programa SRTM, fue generado a partir del procesamiento de pares SAR (Synthetic Aperture RADAR) interferométricos de pasada simultánea, es decir el Transbordador Espacial llevó dos antenas de SAR separadas por un mástil de 60 m. Con estos datos se genera un MDE de excelente calidad pero que está afecto a dos tipos de problemas: a) no puede tener información de altitudes en áreas montañosas en lugares donde se produce sombra de iluminación del RADAR y b) no puede obtener la altitud de objetos que están en permanente movimiento (el agua en lagos, lagunas y mar).

Para el caso de las sombras, simplemente no se genera información y quedan por lo tanto espacios o vacíos en el MDE marcados como "no data" y que deben ser rellenados posteriormente con información disponible de otras fuentes. En este caso, se utilizó un MDE generado a partir de cartografía 1:50.000, disponible para las zonas montañosas de ambas áreas de estudio.

El segundo problema es un poco más difícil de resolver, sobre todo en Lagos y Lagunas. Para el caso del mar, es suficiente aplicar una máscara multiplicativa, consistente en una capa raster de 2 bits cuyas celdas que caen sobre el mar, lagos y lagunas, tienen un valor igual a cero (nivel del mar) y las que caen sobre tierra, un valor igual a 1. Para el caso de Lagos y Lagunas, es necesario realizar una segunda pasada y aplicar una máscara aditiva de 16 bits, cuya celda tiene el valor de la altitud para cada Lago y Laguna del área y el resto con valor igual a cero.

Los modelos SRTM se pueden bajar gratis de Internet y se pueden obtener en dos formatos: a) como archivo binario genérico (extensión .hrf) y como archivo en formato GeoTif. En ambos caso se debe realizar un mosaico, ya que los archivos vienen cortados por cuadrículas de 1 x 1 grado de latitud y longitud.

3.- DISEÑO Y PROGRAMACION DE LA INTERFAZ

De acuerdo a los requerimientos solicitados por la CNR y DGA, se procedió a realizar un diseño conceptual de la interfaz de forma tal de satisfacer por una parte estas necesidades y por otra parte, guiar en la programación de las funciones requeridas.

3.1.- Requerimientos y Consideraciones Iniciales

De acuerdo a lo visto en el punto 2.4, es necesario diferenciar dos aspectos de MAGIC:

- MAGIC como modelo
- MAGIC como sistema

y se hará referencia a ellos como sistema MAGIC o como modelo MAGIC.

Cuando se habla de sistema MAGIC, se está aduciendo a la estructura informática del mismo, esto es a su estructura de datos y a su interfaz, no a la calidad ni pertinencia de sus algoritmos. Para efectos de este proyecto, se considera como una caja negra, sin entrar en validaciones ni objeciones desde el punto de vista de su funcionamiento ni resultados, es más, la interfaz se adaptará a la "topología" de MAGIC, dejando de lado la optimización inmediata que se puede hacer al aplicar correctamente un modelo entidad – relación con topología arco – nodo.

Actualmente el sistema MAGIC no posee capacidades de visualización espacial ni gráfica de datos de entrada ni de salida. Tampoco dispone de herramientas de apoyo al análisis de los resultados como informes de diferencias de los resultados modelados respecto de las demandas a atender por concepto de derechos u otras facilidades.

Los usos habituales del modelo MAGIC son:

- En la DGA, evaluar la disponibilidad del recurso. Esto es una necesidad ineludible debido a que por mandato es quien confiere derechos de agua en la nación.
- En la CNR, evaluar los proyectos de infraestructura de riego desde el punto de vista de factibilidad técnica e impactos.

Las ventajas de incorporar una interfaz y funcionalidad SIG al sistema MAGIC, sin pretender ser exhaustivos, son:

- Ayuda en la generación de algunos datos de entrada que hoy se obtienen manualmente (áreas de riego, cuencas aportantes y laterales).
- Visualización de la red de modelamiento en su contexto espacial real (red de modelación georeferenciada).

- Control instantáneo de la topología y pertinencia de conexión entre los diferentes objetos que se agreguen.
- Capacidad de visualizar los resultados en su contexto espacial y temporal con un sistema dinámico de simbología asociado al año y mes de análisis.

Además se solicitó analizar la posibilidad de incorporar algunas herramientas especiales que pueden ser de utilidad en este sistema, sobre todo cuando no existen datos suficientes de terreno, tales como:

- Cálculo de pendiente de una cuenca.
- Automatizar cálculo de áreas cultivadas y no cultivadas.
- Cálculo de evapotranspiración potencial a partir del mapa digital.
- Automatizar cálculo de largo del drenaje principal.
- Utilizar el modelo MPL independiente de MAGIC para calcular los caudales mensuales de aportes naturales y cuencas laterales sin control fluviométrico.

Analizados los requerimientos y proposiciones, por el personal del equipo consultor en conjunto con personal calificado de la DGA y de la CNR, se llegó a la conclusión que un resultado suficiente, satisfactorio y factible consiste en:

- Crear o modificar escenarios de modelación.
- Agregar nuevos elementos a los escenarios de modelación, o quitar elementos, desde una interfaz con un mapa y posiblemente una imagen satelital de fondo.
- Crear una interfaz amistosa de ingreso de datos, esto es, que los datos puedan ser ingresados desde un mapa de la cuenca, posiblemente con una imagen satelital de fondo, o desde el diagrama de red "pinchando" elementos de la red en su representación cartográfica y obteniendo el despliegue de uno o más formularios para la visualización, ingreso o edición de datos correspondientes al objeto seleccionado.
- Crear una interfaz amistosa de resultados, esto es, que los datos puedan ser visualizados sobre un mapa de la cuenca, posiblemente con una imagen satelital de fondo, o sobre el diagrama de red. Que los datos resultados, de un elemento modelado, se puedan obtener "pinchando" elementos de la red en su representación cartográfica o en el diagrama de red, obteniendo el despliegue de uno o más formularios para visualización de los atributos correspondientes.
- Crear una interfaz que destaque los objetos afectados en la validación de datos de entrada.
- Crear una interfaz que destaque los objetos que puedan generar conflictos producto de un proyecto.

Para lograr la implantación de estos requerimientos se propusieron, para la Interfaz, los siguientes objetivos emergentes:

- Adaptación de la cartografía existente para permitir el paso entre mapa y diagrama de red.
- Recopilar y preprocesar imágenes y convertirlas en ortofotomosaicos.
- Desarrollar programas que permitan la generación automática de Cuencas y Subcuencas ya sean aportantes o laterales.
- Desarrollar programas que permitan ingresar nuevos elementos a la red de modelamiento.
- Desarrollar programas de conversión de los datos de entrada en formularios Windows a las tablas ACCES, de entrada del sistema MAGIC.
- Desarrollar programas de conversión de los datos de texto de salida del sistema MAGIC en formularios Windows.
- Desarrollar programas que muestren las inconsistencias en los datos ingresados.
- Desarrollar programas que destaquen los objetos de la red que al ser afectados puedan generar razones de conflictos, como: déficit respecto de los derechos concedidos, variaciones en el nivel de los acuíferos, déficit en las demandas de centrales eléctricas, etc.

3.2.- Adaptación del SIG a los requerimientos de la estructura de datos de entrada y salida.

La información de entrada y salida del sistema MAGIC maneja diversos objetos con sus respectivos atributos. En la realidad, y también en un sentido cartográfico, estos objetos tienen representaciones lineales, puntuales y areales (o poligonales). Como sistema de red, estos objetos se reducen a nodos (puntos) y conexiones (líneas). Ejemplos de esta dualidad son los embalses y lagos. En la realidad estos son elementos con área no nula y su representación es un polígono al cual convergen varios afluentes o aportantes y del cual salen varios efluentes. Sin embargo en la representación del sistema hídrico como red, este embalse o lago constituye un nodo con múltiples conexiones, que espacialmente es un punto y cuya representación puede ser un símbolo. Otro ejemplo es el caso de los drenes. En una representación cartográfica, dependiendo de la escala, el dren puede estar dibujado como líneas de borde y posiblemente con islas en su interior. Sin embargo, en el diagrama de red es una línea única, y además ésta está interrumpida en cada encuentro con un afluente, o un punto de salida o uso (aún si es no consuntivo).

Esto constituye una dificultad evidente al momento de generar escenarios de modelación a partir de información geográfica. Existen dos soluciones:

- Que el operador y/o constructor del escenario cree en el momento los puntos nodos y líneas manualmente.
- Que en la información base coexistan ambas representaciones, aún cuando no estén ambas visibles.

La primera alternativa resulta tediosa de operar y es ineficiente si se pretenden generar frecuentemente escenarios en una misma área de estudio. La segunda alternativa resulta atractiva, pero obviamente es válida a una escala de modelamiento, pero no lo es si pretendemos afinar o modelar a niveles locales.

Por este motivo postulamos como la mejor solución disponer de la representación cartográfica a nivel de cuencas, a escalas 1:50.000 o de mayor discriminación cuando estén disponibles, el diagrama de red a nivel de cuenca, y, proveer funcionalidad suficiente para seleccionar del diagrama de red los elementos disponibles o crearlos a nivel de escenario con todos sus atributos. Como los elementos de red creados no necesariamente son válidos sólo a nivel de cuenca o realidad, se propone usar las capacidades de segmentación dinámica que provee la herramienta SIG propuesta en la metodología.

Para facilitar la selección de los elementos de red desde una representación cartográfica, se deberá agregar en la base de datos de atributos de los elementos cartográficos un identificador del elemento de red al que pertenecen. Por otra parte se debe poder superponer o representar en ventana paralela el diagrama de red del escenario.

3.3.- Descripción conceptual de la interfaz SIG para el sistema MAGIC.

La interfaz SIG deberá tener las capacidades de:

- Mostrar la información geográfica de la zona en una representación cartográfica tradicional.
- Mostrar ortoimágenes de la zona.
- Mostrar el diagrama de red con los nodos en posiciones reales de acuerdo a sus coordenadas geográficas.
- Superponer cualquier combinación de los anteriores.
- Representar en ventanas paralelas (partiendo la pantalla verticalmente) las ortoimágenes y la información cartográfica a la izquierda y el diagrama de red a la derecha, manteniendo coordinación de escalas.
- Disponer de una paleta de edición con todos los tipos de objetos que contempla MAGIC y de conexiones o líneas, para agregar nuevos objetos al escenario:
 - Acuífero
 - Aporte natural, Cuenca Lateral
 - Canal derivado
 - Canal matriz
 - Central hidroeléctrica
 - Captación puntual
 - Retorno Captación Puntual

- Descarga puntual
 - Embalse
 - Nodo de distribución
 - Pozo
 - Tramo de río
 - Zona de riego
 - Retorno de Zona de Riego
- Especial atención debe darse al parámetro caudal ecológico de cada nodo.
 - Al “pinchado” de elementos de la red se deberá desplegar un submenú con dos opciones:
 - Datos de entrada
 - Resultados
- Al seleccionar “Datos de entrada” debe mostrar los formularios de datos de entrada en modo consulta y edición.
Al seleccionar “Resultados” debe mostrar los datos resultantes de la modelación, en modo consulta.
- La interfaz debe tener la capacidad de destacar:
 - Con círculos rojos los nodos cuyos datos de entrada-salida no correspondan a la cantidad de elementos conectados según la topología.
 - Con círculos amarillos los nodos cuyas salidas no cumplan con las demandas a atender.

La mayor dificultad está en los elementos areales, que en el diagrama de red adquieren carácter de nodo, a veces de conexiones múltiples. La otra dificultad está en que MAGIC opera con el concepto de nodo ficticio para asociar múltiples demandas en vez de asociar las demandas a nodos y/o a tramos. El problema radica en que en la representación cartográfica existe sólo el nodo real y no el ficticio.

3.4.- Diseño Lógico de la Interfaz

La interfaz estará compuesta de tres grandes módulos o ventanas de trabajo, a saber:

- 1) Módulo de Preparación de Información
- 2) Módulo de Generación del Diagrama de Modelación y llenado de tablas de entrada de MAGIC
- 3) Módulo de Análisis de Escenarios Modelados

La figura 1, muestra esquemáticamente estos tres módulos.

Para este Módulo, se propusieron los siguientes objetivos:

1. Crear el MDE, con tamaño de píxel seleccionable por el usuario, a partir de un archivo de curvas de nivel atributadas 3D, un archivo de cotas, y, cuando está disponible, usar el archivo de drenaje para mejorar la representación de las líneas de mayor flexión de la superficie como quebradas y otros cauces. El desarrollo conceptual de los algoritmos se presenta en el Anexo 3.
2. Creación, edición y generación de topología de la Red Hídrica.
3. A partir del MDE y la Red Hídrica, detectar automáticamente el límite de la cuenca o subcuenca ya sea aportante o lateral y usar el algoritmo MPL para sintetizar los caudales para cuencas no controladas.
4. Automatizar los cálculos de pendiente media y longitud de cauces, a partir de una línea trazada en el mapa o seleccionada desde la hidrografía.
5. Creación, edición y caracterización de acuíferos
6. Creación, edición y caracterización de las Zonas de Riego.
7. Manejo y edición de Pozos para sintetizarlos en un punto por área de riego.
8. Herramientas de Selección, manejo de atributos y preparación de coberturas vectoriales básicas (herramientas para: cambiar sentido a un arco, dividir un arco, borrar un arco, eliminar pseudo nodos, etc.).
9. Cargar y/o borrar estadísticas de pluviometría y fluviometría.

Herramientas Vectoriales

Se han diseñado una serie de herramientas vectoriales que permitirán al usuario dejar lista la información base tal como lo requiere el módulo de generación del escenario de modelamiento, estas herramientas son:

- Herramientas para agregar divisorias de agua y otras singularidades que permitan mejorar los datos de ingreso al proceso de construcción del MDE.
- Herramientas de análisis espacial como: intersección, unión, diferencias, corredores) que se utilizarán en la relación entre capas bases como Acuíferos, Zonas de Riego, Pozos, etc.
- Herramientas de edición de elementos espaciales (agregar, borrar, modificar vértices)
- Herramientas de modificación de atributos y llenado de bases de datos de coberturas base.

3.4.2.- MODULO DE GENERACION RED DE MODELAMIENTO

Para este módulo diseñaron una serie de herramientas que permiten automatizar la generación del Diagrama de Modelamiento y por ende las tablas topológicas que requiere MAGIC. Algunas de las herramientas diseñadas son:

- Generación automática de los acuíferos a partir de la cobertura básica del tema.
- Relación espacial de los pozos y sus acuíferos.
- Relación entre las Zonas de Riego y los pozos, con la opción de que el usuario indique, mediante una selección espacial, el objeto final que será destino de las aguas bombeadas.
- Caracterización automática de las cuencas intermedias al momento de agregar una al diagrama.
- Revisión y edición de todas las tablas de entrada a MAGIC que estén relacionadas con el objetos seleccionado en pantalla.
- Selección espacial automática del elemento espacial correspondiente al record de la tabla de entrada que se está analizando.
- Caja de herramientas para agregar o quitar objetos de modelamiento (nodos, nodos secundarios, tramos de ríos y canales, etc.).
- Herramienta para la reconstrucción automática de la topología de la red de modelamiento.

3.4.3.- MODULO DE ANALISIS DE RESULTADOS

Este módulo está diseñado para facilitar el análisis de los resultados que entrega MAGIC. Por un lado, entrega las tablas de salida en formato de texto en una tabla por objeto de modelamiento y por otra, entrega las funciones de simbología para la visualización de caudales, demandas no satisfechas y elementos críticos dentro del sistema. Sus funciones son:

- Búsqueda de elementos que cumplan con valores límites.
- Asignación de simbología especial a todos los elementos
- Generación de tablas estadísticas
- Salida Cartográfica

3.5.- Programación

En este punto se muestran las características de los diferentes módulos programados. El detalle de funcionamiento de la interfaz se presenta en su totalidad en el "Manual de Usuarios" y aquí se han incluido sólo los aspectos más relevantes.

3.5.1.- Modulo De Preparación De Datos

En este módulo se ha programado una serie de herramientas y funcionalidades orientadas a la preparación de información, de acuerdo a la experiencia práctica de implementación que se esta realizando para la cuenca del Río Aconcagua.

Para esto, en la línea de menús de esta ventana tiene indicado bajo el título "Herramientas" y "Procesos_MAGIC", el acceso a toda la funcionalidad especial para preparar la información, esto independiente de todas las herramientas generales de manejo de un Shape.

La figura 2, muestra las opciones del menú preparados especialmente para MAGIC.

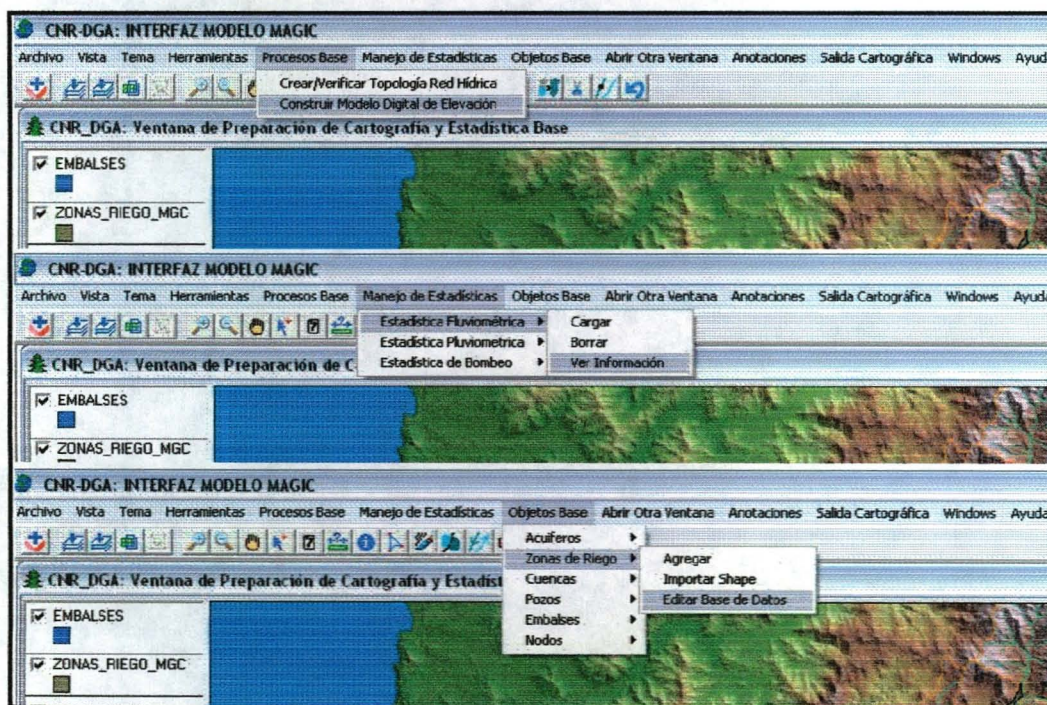


Figura N° 2: Funcionalidades para la Preparación de Datos.

La opción de menú **"Procesos Base"**, entrega las siguientes funcionalidades:

- a) **Construir Modelo Digital de Elevación (MDE)** a partir de curvas de nivel, cotas y red hídrica (como red o cartografía digital). Esta opción abre un dialogo donde el usuario indica los diferentes Shapes a utilizar (curvas, cotas y drenes) y para las dos primeras, el campo que contiene los valores de altitud. También debe indicar el tamaño de la celda de salida para el MDE. Al poner procesar, se genera un MDE cuyo nombre de salida siempre será el mismo, pero estará en el directorio de trabajo especificado al inicio de la sesión. La base conceptual de programación se incluye en Anexo 2.
- b) **Crear/Verificar Topología Red Hídrica:** Esta opción permite generar la topología de la red hídrica. Si existen arcos con sentido cambiado o arcos que no se conectan a un nodo, entrega un mensaje de error y pinta en amarillo los arcos con problemas. El usuario puede grabar estos arcos como shape (convertir dibujo a shape) y usarlo de guía para ir arreglando los problemas de la red. Este proceso consume mucha memoria por lo que se pide al usuario tener cargada sólo la red hídrica que está procesando.

La opción **"Objetos Base"**, está organizada temas y en cada tema se abre un submenú con tres opciones: a) Agregar; b) Importar y c) Editar Base de Datos.

El grupo de funciones **"Objetos Base / Agregar"**, según sea el tema seleccionado, entrega diferentes alternativas para agregar nuevos elementos al tema. Si el tema aún no existe es decir, es la primera vez que se agrega un elemento, la Interfaz lo crea automáticamente.

- a) **Acuíferos:** Se pide al usuario que utilice la herramienta "agregar elemento" ya que lo único que debe hacer es dibujar el polígono correspondiente.
- b) **Generar Zonas de Riego:** en base al fondo de imagen, vista topográfica del MDE y las capas vectoriales de Hidrografía y redes de Canales, se le entrega al usuario dos (2) alternativas de preparación para las Zonas de Riego: 1) que dibuje los límites a mano y 2) si dispone un una capa con información de cultivos, o cualquier shape que contenga polígonos que se puedan utilizar, seleccione dichos polígonos (uso del suelo u otros) y el sistema le genera automáticamente el área de riego.
- c) **Cuencas:** al seleccionar agregar cuencas, se le pide al usuario que seleccione entre dos opciones: a) usar una estadística de caudal que ya exista y b) generar la estadística de caudales con MPL (ver Anexo 4). Seleccionada una de estas opciones, se abre un panel de control donde el usuario podrá agregar un Aporte Natural o una Cuenca Lateral, detectar automáticamente los límites de la cuenca o dibujarlo en pantalla y grabar la información.
- d) **Generar Zonas de Riego:** en base al fondo de imagen, vista topográfica del MDE y las capas vectoriales de Hidrografía y redes de Canales, se le entrega al usuario dos (2) alternativas de preparación para las Zonas de Riego: 1) que dibuje los límites a mano y 2) si dispone un una capa con información de cultivos, o cualquier shape que contenga polígonos que se

puedan utilizar, seleccione dichos polígonos (uso del suelo u otros) y el sistema le genera automáticamente el área de riego.

- e) **Pozos:** Esta funcionalidad permite al usuario ir agrupando (para el caso de tener decenas de pozos por zona de riego) pozos según su uso (riego, agua potable, industria, minería), sector de riego y acuífero.
- f) **Embalses:** Se pide al usuario que todos los embalses nuevos se agreguen en la etapa de construcción del diagrama de modelación.
- g) **Nodos:** se abre un dialogo donde además de poner físicamente el nodo, exactamente sobre la red hídrica, llene los atributos asociados.

El grupo de funciones “**Objetos Base / Importar**”, permite al usuario generar el tema a partir de una capa de información espacial ya existente pero que no tiene la base de datos necesaria para que funcione la Interfaz.

El grupo de funciones “**Objetos Base / Editar Base de Datos**”, abre para cada tema un dialogo que permite editar los atributos de cualquier elemento.

El grupo de funciones “**Estadísticas MAGIC**”, permite cargar en la base de datos ACCESS de MAGIC o también borrar, los archivos de estadística Pluviométrica que se utilizarán en el cálculo de caudales sintetizados para las hoyas intermedias y zonas de riego y las estadísticas Fluvimétricas utilizada en los aportes naturales.

El formato CSV, columnas delimitadas por coma, es un formato que ofrece EXCEL para exportar datos a otros sistemas, independizándose de tener dicho software en el computador. En general el usuario manejará todo en una planilla EXCEL y una vez listos, los grabará como formato CSV para DOS. Se pueden visualizar, además de EXCEL, con NotePad o WORDPAD.

El siguiente ejemplo, muestra como se vería este tipo de archivo al abrirlo con NotePad.

```
AGNO,ABR,MAY,JUN,JUL,AGO,OCT,NOV,DIC,ENE,FEB,MAR
1950,13.9,14,9.2,7.4,12.4,13.4,23.4,43,76.1,43.4,28.4,20.2
1951,14.4,11.5,12.9,17.7,15.6,16.3,22.2,47.6,57.7,43.4,26,18
1952,13.8,13.4,13.8,12.2,12.7,19.2,26.2,59,77.2,47.4,37.9,23.9
1953,16.7,14.1,15.9,14.1,27.8,42.1,44.5,125,179,126,77,37.5
1954,20.1,14.2,14.8,12,14.9,19.7,24,57.7,61.3,54.1,33.9,21
1955,13.5,13.7,16.1,16.3,15.1,17.3,23.6,54.2,54.9,36.8,30.1,20.1
1956,13.3,15.5,9.7,9.3,11.8,14.8,21.2,35.4,30.5,32.5,25.4,19.5
1957,13.7,16.7,17.1,14.2,16.3,16.6,24.2,43.3,60,42.3,24.6,21
1958,14.5,11.7,16.1,13.3,10.9,14.9,35.4,42.9,40.1,29.7,27.1,20.4
1959,13.7,18.8,14.9,14.5,18.9,22.3,25.8,49.4,69.3,41.4,31.4,19.7
1960,12.2,8.6,13.1,11.3,13.4,16.4,30.6,73.2,83.7,44.6,32.1,28.3
```

Como se puede apreciar, la primera línea corresponde a los nombres de los campos que tendrá la base de datos que reciba este archivo o el nombre de las columnas en EXCEL.

El usuario, antes de utilizar la interfaz, debe además preparar una serie de archivos en formato CSV para, por ejemplo, caracterizar las zonas de riego y los acuíferos. Esta información normalmente se recopila de estudios específicos y en la interfaz se espera que estos archivos se carguen de manera coordinada con la numeración de zonas de riego y acuíferos que se usarán en a modelación.

Para cada objeto que requiera de estos archivos, la interfaz dispone de una función especial para leerlos.

A continuación y como ejemplo de algunas funcionalidades programadas para la interfaz, se muestran los diálogos que se abren al seleccionar una opción de los submenús, que se muestran en la figura 2.

Crear Zonas de Riego:

Esta funcionalidad corresponde a un conjunto de Herramientas Vectoriales que actúan sobre la capa de información base correspondiente al Uso Actual del Suelo, capa formada por polígonos cuyos atributos son el tipo de cultivo predominante dentro de él. Su interfaz es la siguiente:

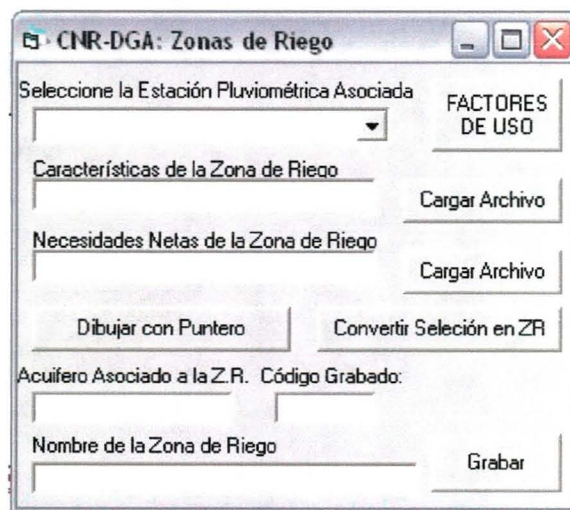


Figura 4: Diálogo para crear Zonas (sectores) de Riego

Como se aprecia en la Figura 4, el usuario debe indicar cual es la estadística pluviométrica a utilizar por MAGIC (previamente cargada), donde se encuentran los archivos CSV con las Características y la Necesidades Netas Mensuales de la Zona de Riego.

Enseguida dibuja la zona o la genera a partir de un conjunto de polígonos de otro tema (por ejemplo Uso del Suelo), al hacer esto el sistema le indica en que acuífero está, le pone un nombre a dicha zona y graba los datos. (grabar los datos actualiza tanto el shape de Zonas de Riego como la Base de Datos ACCESS que usará MAGIC.

Generación de Cuencas con MPL:

El diálogo que se abre para generar Aporte Naturales o Cuencas Laterales, con la opción de generar la estadística de caudales con MPL, permite por una parte indicar la estadística pluviométrica que se utilizará en el cálculo del caudal sintetizado para la hoya como así también, detectar la hoya intermedia a partir de un punto pinchado sobre la red hídrica o dibujada a mano por el usuario.

Una vez hecho esto, el sistema llena la información de las características de dicha cuenca en el Shape, y el usuario está en condiciones de calcular el caudal para dicha hoya. El resultado de este cálculo se visualiza en una tabla donde el usuario puede analizar los datos generados y si está conforme, le pone un nombre y graba la información (ver Figura 5).

CNR_DGA: Hoyas Intermedias

Tipo de Cuenca
☐ Aporte Natural ☐ Cuenca Lateral

Vector de Evapotranspiración

PARAMETROS:

Sini 0.01 EZini 0.001

A: 0.911 B 0.850 FC 6.00 K 38

ALFA 62.0 SCC 0.974 SMIN 0.230

SCRII 0.805 HMAX 295.0 PMIN 0.09

☐ Modificar Cuenca según Sectores de Riego

Detectar Cuenca Dibujar Cuenca

Superficie (Km2) F. Este (x) F. Norte (y)

Calcular Estadística

Nombre de la Cuenca

GRABAR

Figura 5: Dialogo para crear Cuencas con MPL

Como se puede apreciar en el dialogo, el usuario puede optar por modificar automáticamente el límite de la cuenca, en caso que se sobreponga con las Zonas de Riego.

Crear Cuencas con Estadística Existente:

En este caso, la Interfaz toma la estadística de caudales del archivo que indica el usuario (ver Fig. 6).

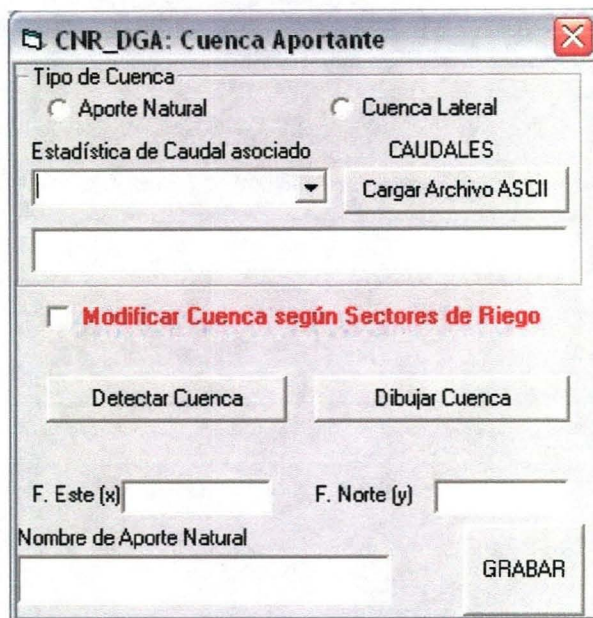


Figura 6: Diálogo para crear Cuencas con Estadística Existente

Preparación de Embalses:

Esta opción permite al usuario recorrer la base de datos de los cuerpos de agua (mostrando la ubicación de cada uno) y decidir si el cuerpo de agua formará parte de los embalses en la modelación. Como el diálogo indica, los embalses nuevos y el archivo que caracteriza a los embalses se activan o incluyen en la etapa de Modelación. Por ahora sólo interesa saber cuales son los embalses existentes que serán considerados posteriormente (ver Fig. 7).

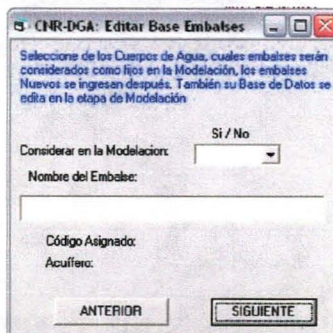


Figura 7: Diálogo para la preparación de Embalses

Preparación de Acuíferos:

El shape de acuíferos se prepara utilizando las herramientas normales de dibujo de la interfaz.

El sistema genera un shape con una base de datos tal como la necesita MAGIC y le entrega al usuario la facilidad para ir llenando dicha base de datos ya sea directamente en la interfaz o leyendo el archivo CSV preparado para los acuíferos. (ver Fig. 8)

Figura 8: Diálogo para Editar Base de Datos de Acuíferos

Preparación de Pozos:

La capa de Pozos normalmente contiene cientos o miles de elementos que para efectos de modelación, un grupo de ellos se pueden considerar como representativo del conjunto porque está sobre el mismo acuífero, la misma zona de riego y tiene el mismo uso. El diálogo de la interfaz, facilita al usuario ir agrupando los pozos, suma su caudal de bombeo, ve en que acuífero está, si su uso es riego, a que zona de riego pertenece y le asigna un código único, que será utilizado durante la modelación y posteriormente en la visualización de resultados.

Herramientas de la Ventana de Cartografía y Estadística:

Además de las herramientas normales de un SIG para manejar el despliegue, se programaron herramientas especiales para la Interfaz SIG-MAGIC (Ver figura 9)

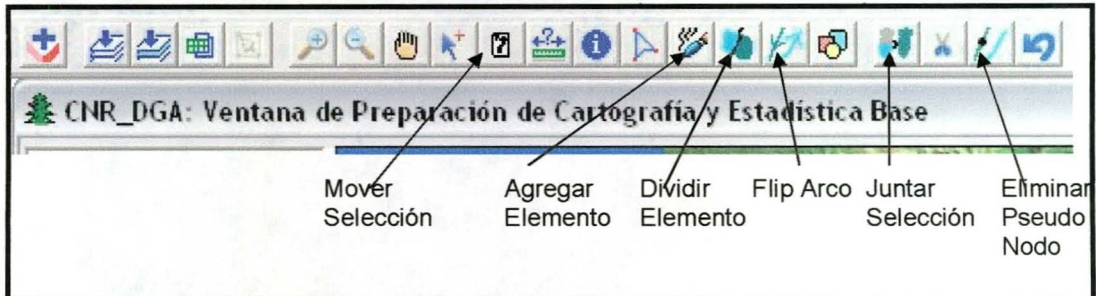


Figura N° 9: Herramientas especiales para MAGIC

1. Flip de Arco: Invierte el sentido de un arco. Fundamental durante la preparación de la Red Hídrica.
2. Dividir Elemento: Trazando una línea, se puede dividir en dos otra línea o un polígono.
3. Agregar elemento: se pueden agregar puntos, líneas y polígonos, según el tema activo.
4. Mover Sección: el usuario selecciona un conjunto de elementos y al pinchar esta opción se activa el sistema para recibir una línea que indica desde donde y hasta donde se quiere mover el conjunto seleccionado.
5. Sacar Pseudo Nodos: Muchas veces la red hídrica contiene segmentos pequeños de arcos que dificultan la selección espacial de ríos, esteros o quebradas. Esta opción elimina todos los nodos con valencia 2 (llegan o salen 2 arcos) y deja un shape más limpio.
6. Juntar Selección: es la herramienta contraria a dividir elementos. Se quiere juntar dos líneas, estas deben ser contiguas y el algoritmo verifica y corrige los sentidos. Si se quiere juntar polígonos, estos pueden ser más de dos y no necesariamente ser contiguos (concepto de zonas).

Terminada la etapa de preparación de información, el usuario puede pasar al módulo o Ventana de Modelación.

3.5.2.- Modulo De Modelación

La ventana de Modelación entrega todas las funcionalidades para que el usuario comience poco a poco a generar el diagrama o red de Modelación, esto es una red conexa, topológicamente válida.

Los diferentes objetos que utiliza MAGIC, se manejan en este diagrama de modelación ya sea como Nodos o segmentos de Arcos. En lenguaje de MAGIC, la palabra Nodo se utiliza solamente para indicar un corte en la red Hídrica o en la red de canales (nodo secundario) y el resto de los elementos que espacialmente también son Nodos (lenguaje SIG) se refieren por su nombre, por ejemplo Aporte Natural, Acuífero, Zona de Riego, Hoya Intermedia, Pozo, Embalse.

Uniendo a todos estos elementos, el usuario debe dibujar conectores mediante los cuales se traspasan caudales (oferta y demanda) de un elemento a otro. Estos conectores son ficticios y reciben nombres de acuerdo a la funcionalidad que prestan. Por ejemplo un Derrame, es un conector entre una Zona de Riego (nodo SIG) a un Nodo del Sistema (punto sobre la red hídrica).

Por lo tanto, cada conector tiene sus restricciones o condiciones específicas a dicho elemento y deben ser respetadas por el sistema. De hecho, no se podría comenzar a dibujar ningún conector si primero no se ha cargado la información que da origen a los elementos base de la modelación, estos son Acuíferos, Zonas de Riego, Embalses, Pozos, Red Hídrica y optativamente Canales (pueden existir antes como líneas o ser dibujados como conector).

En la ventana de modelación se cuenta con una barra de herramienta especialmente diseñada para agregar los temas base y dibujar los diferentes tipos de conectores (ver figura 10 y Manual de Usuario).



Figura 10: Herramientas de la Ventana de Modelación

Así por ejemplo, al cargar el shape de Cuencas, que es un shape de polígonos, se generan los elementos de borde del diagrama (Nodos SIG, shape de puntos). Así sucesivamente, cada capa que se carga con esta parte del diálogo, genera el elemento respectivo con su código propio y su base de datos que se escribe en el archivo ACCESS que usará MAGIC.

Una vez cargadas estas capas, el usuario puede comenzar a crear los conectores entre los diferentes elementos y también puede crear nodos nuevos en determinados casos. Por ejemplo, al parar de dibujar un tramo de Canal, si este no llega a un elemento predefinido, se crea automáticamente un Nodo Secundario o si dibuja un conector a una Central Hidroeléctrica y esta no existe como elemento base (lo más seguro es que sea así), se genera un elemento especial (Nodo SIG) que caracterizará dicha central.

En el caso de los tramos de río (TR), el sistema dibujará como conector la forma real del segmento de arco que se encuentre entre el punto inicial y final que marcó el usuario, respetando el sentido del flujo natural de las aguas o un conector recto si el usuario así lo decide.

Finalmente, cada conector y cada elemento del diagrama de modelación puede ser visualizado con símbolos especiales, que el usuario puede cambiar, en forma, tamaño y color, a su gusto. Esto dependerá sólo de la claridad con que se aprecien los diferentes objetos en el diagrama

Una vez chequeado y corregido el diagrama de modelación, el usuario selecciona la opción "Topología MAGIC" (ver figura 11) y recorre las tres opciones que entrega: a) Verificar Topología: recorre los objetos creados y escribe en un archivo de texto los errores encontrados; b) Revisar Archivo de Errores: el usuario puede leer que errores existen y proceder a corregirlos y c) Grabar Topología: una vez aceptada la topología, esta se puede grabar

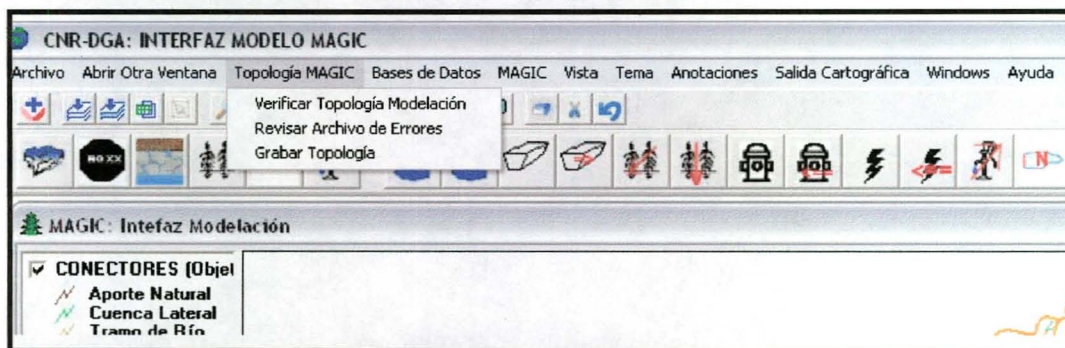


Figura 11: Opciones de menú para la Topología

Una vez grabada la Topología, el usuario debe, a través de la opción de menú "Bases de Datos" verificar los atributos grabados en la base de datos ACCESS que usará MAGIC y procede a completar y/o corregir los valores.

Hecho esto, el usuario puede llamar al software MAGIC, correr la primera etapa de la simulación, verificar los archivos intermedios y correr la segunda y última etapa de la simulación, cuyo resultado podrá visualizar utilizando nuevamente la interfaz, con sus ventanas de simulación.

3.5.3.- Modulo De Análisis De Resultados

Este módulo está diseñado para facilitar el análisis de los resultados que entrega MAGIC. Este resultado es un conjunto de archivos en formato ASCII, uno por cada elemento del sistema, y contienen el balance de caudales para cada año de simulación, para cada uno de ellos.

Las herramientas programadas para esta parte de la interfaz consisten en leer y unificar estos archivos ASCII, generando tablas en ACCESS que pueden ser enlazadas con el diagrama de modelación hecho en el módulo anterior.

Hecho esto, el usuario puede visualizar los resultados por cada Año y Mes simulado, por promedios mensuales de la serie de tiempo o por la búsqueda de valores críticos durante la simulación (en que año y mes se producen problemas o cual es el valor promedio de todos los años donde no se satisfizo la demanda de tal o cual elemento).

Todo esto lo puede hacer separadamente en dos ventanas de simulación y compara resultados interactivamente. Se deja al usuario la opción de utilizar simbologías específicas para la visualización de resultados. Estas simbologías combinan color y ancho de línea (como buffer en los conectores y nodos, proporcionales al caudal que pasa por ellos).

Esta parte de la interfaz podrá ser probada y mejorada una vez que se cuente con los resultados de la primera cuenca simulada ya que el requisito fundamental es que exista una relación biunívoca entre el Diagrama de Modelación y los resultados de MAGIC (códigos de los objetos del sistema).

4.- Aplicación de la Interfaz a las Cuencas de Aconcagua y Maipo

Es capítulo describe el procedimiento utilizando la Interfaz para los casos específicos de las Cuencas de los Ríos Aconcagua y Maipo.

4.1 Preparación de la Información General.

La primera actividad de preparación de datos corresponde a la generación del Modelo Digital de Elevación. En este caso se decidió utilizar los modelos SRTM de NASA por su calidad en el detalle topográfico entregado. De no ser así, se puede generar un MDE a partir de las curvas de nivel y cotas obtenidas de alguna restitución aerofotogramétrica y utilizando el algoritmo programado en la interfaz, generar el MDE. El archivo MDE es guardado en formato binario simple de 16 bit, con extensión .dat, y un archivo de cabecera con extensión .hdr. El nombre de estos archivos debe ser "dem_cuenca".

La segunda actividad corresponde a la preparación de la Red Hídrica, actividad que se facilita mucho si en la interfaz de cuanta con un fondo de imagen (imagen o foto aérea ortorectificada) y con el MDE transformado a imagen de luz y sombra (archivo generado por la interfaz al construir el MDE o con otro software en caso contrario).

Las siguientes actividades corresponden a la preparación de los objetos principales de modelación, en este orden: Cargar estadísticas de pluviometría y fluviometría, definir la Cuencas (aportantes y laterales), generar los Acuíferos, después generar las Zonas de Riego, procesar la información de Pozos para generar un punto representativo por zona de riego y por último, la información de Embalses existentes (los embalses nuevos se ponen en la fase de construcción del Diagrama de Modelación).

Todas estas actividades se realizan mediante el módulo de cartografía base de la interfaz.

4.2 Creación del Diagrama de Modelación.

Una vez terminada la etapa de preparación de información, a través de la “Ventana de Modelación” de la Interfaz, se cargan las capas de información creadas (cuencas, acuíferos, zonas de Riego, Embalses y Pozos).

Al cargar estas capas, aparecen en la ventana de modelación los puntos representativos de cada objeto cargado y el sistema queda listo para que el usuario comience a poner los conectores entre cada elemento.

Utilizando la herramienta de dibujar conectores, el diagrama de modelación va tomando forma y cada tipo de conector verifica que topológicamente este correcto. Los conectores se pueden dibujar mediante trazos rectos o curvos, a excepción de los tramos de río, que el conector automáticamente será la parte de la red hídrica que le corresponde a ese tramo.

Terminada de construir la red de modelación, el usuario selecciona las opciones de “Topología MAGIC”, cuyo primer paso es la verificación Topológica, proceso que indica al usuario si falta algún objeto dentro del diagrama de modelación y si es el caso, genera un archivo de errores que el usuario puede revisar, corregir y volver a verificar la topología.

Si todo está correcto, aparece un mensaje “Topología Correcta, puede Grabar”. Una vez grabada las tablas topológicas, sólo queda por revisar los atributos de cada objeto, mediante la opción de menú “Bases de Datos”. La figura 12, muestra el Diagrama de Modelación generado para el Río Aconcagua.

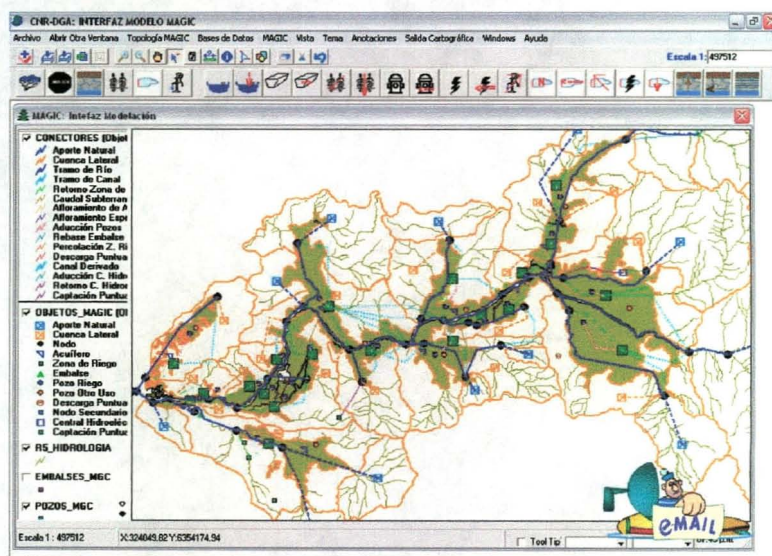


Figura N° 12: Diagrama de Modelación Río Aconcagua

Una vez que se ejecuta MAGIC, se generan una serie de archivos de textos que serán leídos por las “Ventanas de Escenarios de Simulación” las cuales permiten analizar los flujos críticos dentro de la cuenca, las demandas insatisfechas y los sectores con oferta de caudal.

4.3 Análisis de Resultados

La interfaz dispone de dos ventanas de escenarios de simulación, donde el usuario puede comparar los resultados de dos diagramas de modelación diferentes (en diferentes directorios). Para esto, se le pide al usuario que indique el directorio de donde leerá los resultados de cada corrida de MAGIC.

Una vez hecho esto, el sistema cargará los diagramas de modelación utilizados y la ventana quedará lista para que usuario utilice las herramientas de análisis programadas en la Interfaz.

En esta etapa puede consultar por los caudales de cualquier objeto del diagrama y recorrer año a año o mes a mes los resultados obtenidos. Si fija caudales críticos para cualquier elemento, el sistema le marca con un símbolo especial aquellos objetos que están bajo el mínimo establecido.

Debe quedar claro que la etapa crítica en todo el proceso es la de preparación de la información, sobre todo la preparación de los atributos iniciales de cada objeto modelado. Por otra parte, la interfaz no tiene relación con la coherencia de los resultados ya que es sólo un instrumento para facilitar la creación de la “Topología de Modelación” y su objetivo es agilizar la generación y verificación de la base de datos que utilizará MAGIC, evitando el llenado tradicional a hecho completamente a mano.

Este proceso se realizó para ambas cuencas y los resultados obtenidos fueron bastante aceptables, quedando claro que a futuro se podrán mejorar, a medida que se afine el manejo interno de algunos objetos en MAGIC.