Distr.
RESTRINGIDA

E/CEPAL/R.344/Rev.1
19 de enero de 1984

ORIGINAL: ESPAÑOL

C E P A L

Comisión Económica para América Latina

ORDENAMIENTO DE RECURSOS HIDRICOS Y MODELOS MATEMATICOS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE *

* Este documento fue preparado por la División de Recursos Naturales y Energía de la CEPAL para el Tercer Seminario Nacional de Hidrología realizado en Lima, Perú, del 26 al 30 de septiembre de 1983. Las opiniones expresadas en este documento son de la exclusiva responsabilidad de la División y pueden no coincidir con las de la Organización.

84-1-99

INDICE

/1. Introducción

1. Introducción

El desarrollo de la tecnología para el procesamiento de datos está alcanzando proporciones revolucionarias. El más espectacular es la popularización de las procesadoras electrónicas que está abriendo una nueva era en la historia de la humanidad: la era de la información. El campo de los recursos naturales, entre ellos el del agua, tiene que adaptarse rápidamente a este proceso para acelerar asimismo su desarrollo en beneficio del hombre y de la sociedad. Una forma de otpimizar ese desarrollo puede ser mediante el ordenamiento de este recurso el que puede ser ejecutado más eficiente y rápidamente haciendo uso de una herramienta muy poderosa que ha sido desarrollada precisamente gracias a las computadoras: los modelos matemáticos.

La intención de este trabajo es enfocar la situación en América Latina y el Caribe en la planificación u ordenamiento de los recursos hídricos y el uso de modelos matemáticos relacionados y tratar de indicar cuáles son las tendencias futuras en ambos campos. Se incluye un capítulo que resume la situación de ese ordenamiento en América Latina y el Caribe considerando su avance, los objetivos y el número de países que lo han emprendido. Otro capítulo analiza la relación que existe entre las computadoras, los modelos matemáticos y las diferentes etapas del ordenamiento. Enseguida se analiza cuáles son las tendencias y que es lo que se espera en el campo de las micro-procesadoras y el uso de imágenes del Landsat y cómo se espera que estos afecten el desarrollo de los recursos hídricos.

Un siguiente capítulo trata específicamente de los modelos existentes y que pueden aplicarse directamente a uno o más de los diferentes procesos que comprende el ordenamiento de los recursos hídricos. Este, como lo saben muy bien los planificadores, economistas e ingenieros es bastante complejo ya que comprende una serie de operaciones que incluyen la evaluación de las ofertas de agua en todas sus formas y situaciones, y el pronóstico de la demanda del agua por todos los sectores en función del crecimiento del país y las tareas de sistematizar las operaciones de uso del agua compatibilizando las ofertas y demandas, en función de las facilidades físicas presente y previstas en el país. De los modelos matemáticos que se presentan se ha puesto énfasis en aquellos que sirven para evaluar las ofertas en vista de que es donde existe más experiencia y disponibilidad. En lo que se refiere a la demanda se menciona al modelo prospectivo, mientras que

/en lo

en lo que respecta a la sistematización del uso del agua se presenta un modelo para simular un sistema complejo de uso del agua en una cuenca y otro de operación de reservorios. Finalmente, se encuentra un capítulo sobre el uso actual de modelos en América Latina y el Caribe y otro de conclusiones y recomendaciones.

Se espera avivar el interés de todas las personas involucradas en el uso de este valioso e irremplazable recurso que es el agua, desde el alto funcionario hasta el operario de un distrito de riegos por ejemplo, para que emprendan con entusiasmo y fe la tarea de desarrollarlo lo más rápida y eficientemente posible haciendo uso de los medios que el avance de la ciencia y tecnología ha puesto en sus manos.

2. El ordenamiento de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe

El ordenamiento de los recursos hídricos es una actividad que consiste en establecer un conjunto de principios, normas y procedimientos para guiar el aprovechamiento de las aguas de un país de una región en armonía con intereses sociales, económicos y ambientales de desarrollo. Varios países de América Latina y el Caribe tienen o han iniciado el desarrollo de planes de ordenamiento de recursos hídricos, que con diferentes denominaciones 1/ permiten guiar la compatibilización de la oferta y la demanda de agua a corto, mediano y largo plazo en sus territorios. A continuación se resaltan algunos aspectos importantes de dichos planes.

2.1 El proceso de ordenamiento de los recursos hídricos

Consiste en una serie de medidas que permiten:

a) conocer la disponibilidad y calidad del agua en sus diferentes formas tanto en el tiempo como en el espacio;

b) conocer las demandas que tiene el hombre sobre este recurso para satisfacer sus múltiples necesidades, igualmente en cantidad, calidad, tiempo y lugar;

c) diseñar un conjunto de medidas para compatibilizar estas necesidades y disponibilidades a corto, mediano y largo plazo.

1/ Los planes nacionales de ordenamiento de recursos hídricos se conocen también como planes de aprovechamiento de Aguas y/o de Recursos Hídricos, Planes de Agua, Plan Nacional Hidraúlico, Plan Hidraúlico y otros similares.

/La figura

La figura 2.1 es una ilustración muy simplificada de este concepto. El desarrollo completo de un plan de ordenamiento requiere sin embargo muchísimos más considerandos como puede apreciarse en la figura 2.2 que corresponde al Plan Nacional Hidráulico de México. Naturalmente, en cada país variarán los procedimientos a seguir para formular y aplicar un plan en función de sus necesidades y posibilidades aunque no variarán en sus objetivos básicos.

2.2 La situación del ordenamiento de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe

Debido a las ventajas que tiene un plan de ordenamiento de los recursos hídricos (ver cuadro 2.2) son cada vez más los países de América Latina y el Caribe que se encuentran elaborándolos. En el mapa de la figura 2.3, se aprecia que los países con planes nacionales en operación o avanzados son México, Venezuela, El Salvador, Cuba y el Perú. Colombia está en plena ejecución del estudio inicial, y Ecuador tiene concluido los términos de referencia de un plan nacional.

Otros países que han iniciado proyectos para emprender el ordenamiento de sus recursos hídricos son República Dominicana, Jamaica y Honduras.

Los demás países de la región aun no han considerado necesaria la formulación de un plan nacional pero en su mayoría tienen planes de aprovechamiento integral de aguas a nivel de cuencas o a niveles regionales.

El cuadro 2.1 es un resumen del estado de la planificación del agua en la región.

2.3 Objetivos de los planes de ordenamiento

El cuadro 2.2 presenta en forma resumida los objetivos consignados en los planes nacionales disponibles. Es claro que el objetivo central de todos los planes es que el agua sea utilizada armonizando las necesidades de todos los sectores sociales, económicos y ambientales del país.

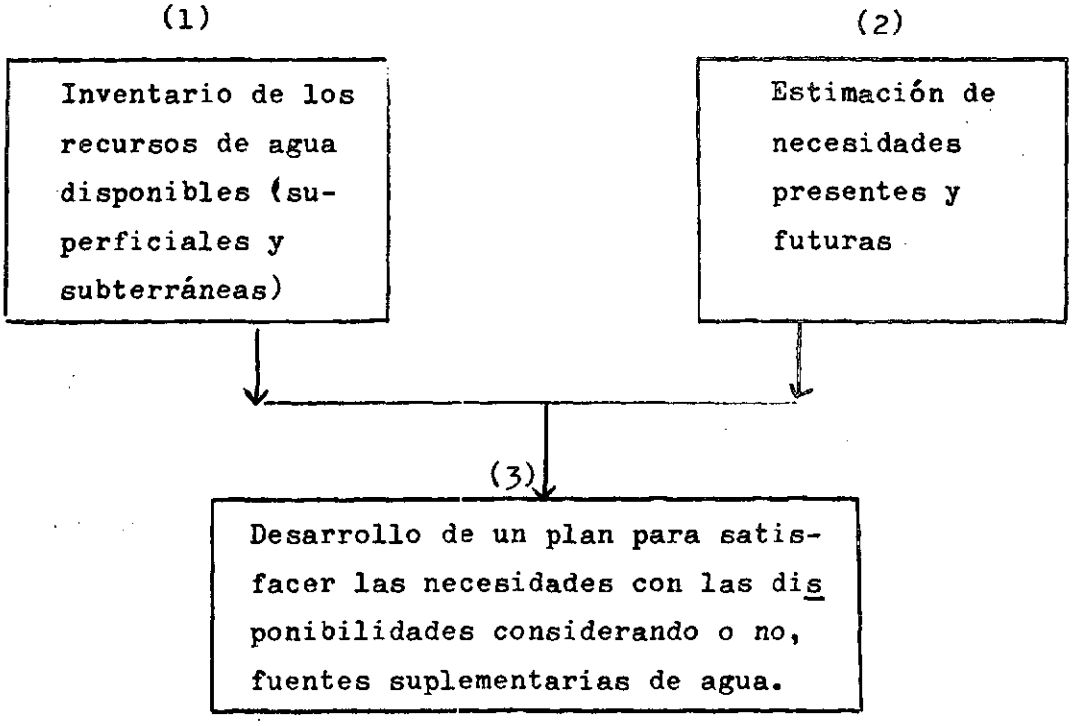
2.4 Efectos de la formulación de los planes de ordenamiento

Uno de los resultados inmediatos de la ejecución de un plan de ordenamiento del agua es la puesta en evidencia del rol importantísimo que tiene este recurso en el desarrollo de un país o una región.

/Figura 2.1

Fig. 2.1

TRES PASOS LOGICOS DEL PROCESO DE PLANIFICACION DEL RECURSO AGUA

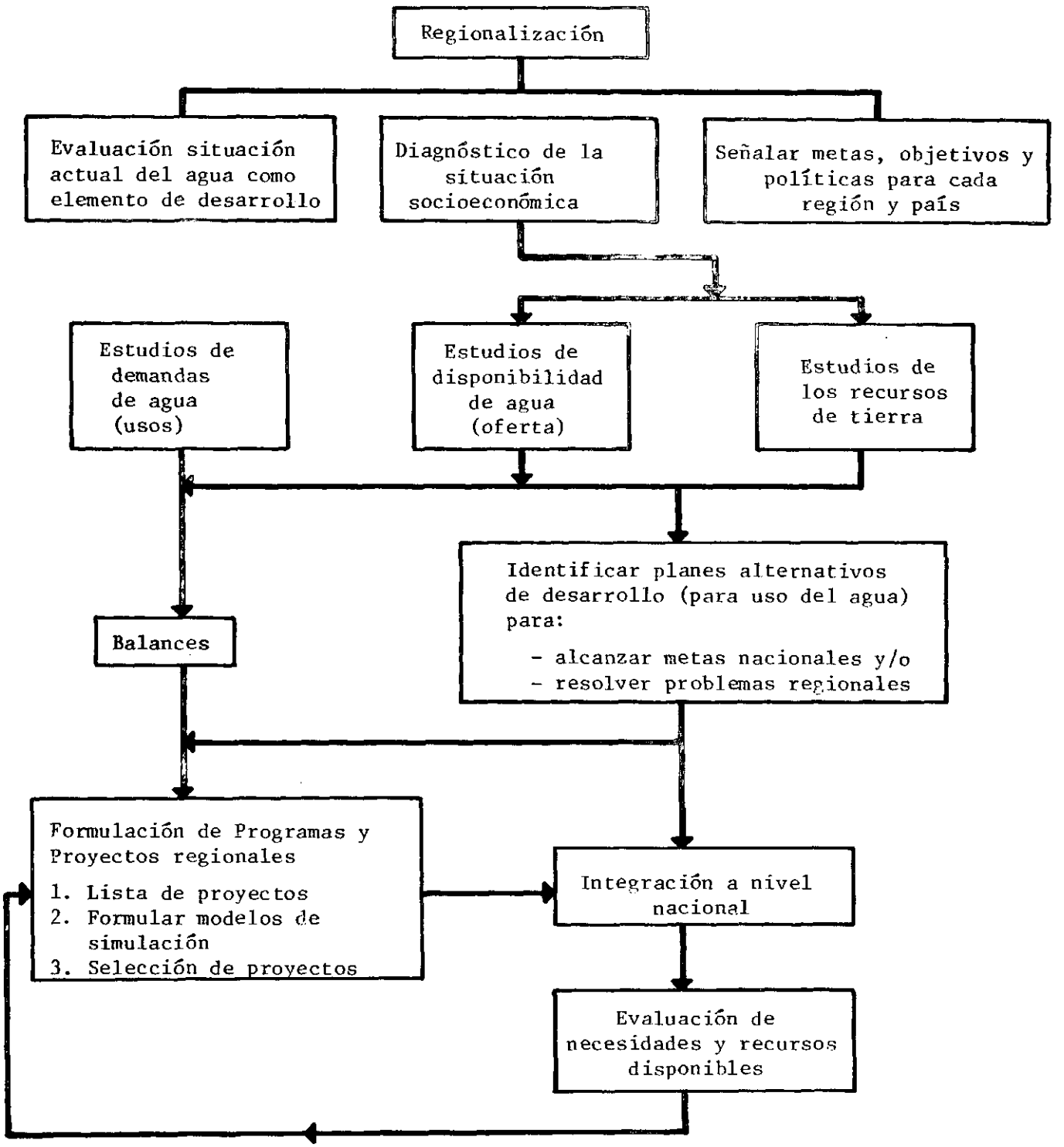


Fuente: Frederick L. Hotes, "Water planning, some personal observations and experiences", Report to the World Bank, Washington, D.C., 1982.

/Fig. 2.2

Fig. 2.2

METODOLOGIA GENERAL PARA LA FORMULACION DE UN PLAN NACIONAL HIDRAULICO */



*/ Elaborado en base a: González Villareal, F.J., "Central Planning in Water Resources Development", Water Resources Planning: Experiences in a National and Regional Context, U.N., TCD/Sem. 801, Nueva York, 1980.

/Fig. 2.3

Fig. 2.3

PAISES LATINOAMERICANOS QUE CUENTAN CON UN PLAN DE ORDENAMIENTO DEL AGUA

Cuadro 2.1

LOS PLANES NACIONALES DE ORDENAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE

País	Nombre del Plan Nivel Nacional	Año de inicio	Año de publicación Versión 1	Año de publicación Versión 2	Entidad coordinadora	Entidades ejecutoras	Asesoría/ asistencia internacional
Argentina	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Bahamas	Sin información.	--	--	--	--	--	--
Barbados	" "	--	--	--	--	--	--
Bolivia	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Brasil	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Colombia	Plan Nacional de Aguas.	1982	--	--	Depto.Nacional de Planeación	Consultoras Nacionales	Prevista
Costa Rica	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Cuba	Plan de Aprovechamiento Hidráulico	1970	s/i	s/i	Sin información	Instituto de Hidroeconomía	Sin información
Chile	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Ecuador	Plan Nacional Hidráulico	1982	--	--	Instituto Nac.de Rec.Hidráulicos (INERHI)	INERHI	OEA/Gob.de España
El Salvador	Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hidricos	1979	1982	--	Ministerio de Agricultura	Ministerio de Agricultura	PNUD
Guatemala	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Guyana	Sin información.	--	--	--	--	--	--
Haití	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Honduras	Plan Nacional de Recursos Hídricos 1979-1983	1979	1979	--	Consejo Superior de Planif.Económica (CONSUPLANE)	CONSUPLANE	--
Jamaica	No tiene.	--	--	--	--	--	--
México	Plan Nacional Hidráulico	1972	1975	1981	Comisión del Plan Nacional Hidráulico	Comisión del Plan Nacional Hidráulico	PNUD en primera fas

/Concl.

Cuadro 2.1 (concl.)

País	Nombre del Plan Nivel Nacional	Año de inicio	Año de publicación Versión 1	Año de publicación Versión 2	Entidad coordinadora	Entidades ejecutoras	Asesoría/ asistencia internacional
Nicaragua	Sin información.	--	--	--	--	--	--
Panamá	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Paraguay	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Perú	Plan Nacional de Ordenamiento de Rec.Hídricos	1977	--	--	Comisión Multisectorial del Plan Nacional de Ordenamiento de los Rec. Hidráulicos	Diferentes entidades estatales	Gob.Venezuela
Rep.Dominicana	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Suriname	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Trinidad y Tobago	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Uruguay	No tiene.	--	--	--	--	--	--
Venezuela	Plan Nacional de Aprovechamiento de Recursos Hídricos	1968	1972	--	Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Rec.Hidráulicos	Grupos de Trabajo de entidades estatales	--

/Cuadro 2.2

Cuadro 2.2

OBJETIVOS CONSIGNADOS EN LOS PLANES DE ORDENAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS EXISTENTES EN LA REGION

- aprovechar racionalmente el recurso hídrico
- conocer las disponibilidades totales de agua en el país
- satisfacer las necesidades de agua de todos los sectores socioeconómicos
- mantener el equilibrio eco-sistémico
- asegurar defensa contra acción destructiva de las aguas y desarrollar medidas preventivas contra los efectos de las sequías
- preservar la calidad de las aguas
- manejar el recurso hídrico conjuntamente con los otros recursos naturales
- determinar prioridades de inversiones
- estimular la participación del público en la conservación del agua
- capacitar personal para el manejo racional del agua
- mejorar las relaciones inter-institucionales de los sectores usuarios del agua
- promover la investigación para el buen aprovechamiento del agua

La formulación de un plan de ordenamiento de recursos hídricos implica:

a) que éste forme parte preferiblemente de los planes de desarrollo del país. En particular países con problemas agudos de escasez de agua deben tratar de asociar el ordenamiento territorial con la regionalización hidráulica dada la estrecha relación entre el aprovechamiento del agua y el desarrollo, así como disponer de un claro ordenamiento de proyectos en función de metas concretas de desarrollo;

b) considerar que el agua puede ser un elemento muy restrictivo, tanto por exceso como por defecto, para el desarrollo de una región y que superar estas restricciones puede demandar muchísimos años y grandes inversiones por lo que es necesario prevenir estos aspectos. No hay que olvidar que los períodos de maduración de un proyecto de aprovechamiento hidráulico mayor son generalmente muy largos ya que los lapsos transcurridos entre la concepción de un proyecto y su ejecución superan fácilmente los 20 a 30 años;

/c) permite

c) permite prever con anticipación, las probables cadenas o tramas de efectos de las acciones de los proyectos en el medio ambiente y tomar las medidas preventivas para maximizar los efectos positivos causados por los cambios ambientales y tratar de evitar causar efectos negativos, sobre todo irreversibles.

Además de estos considerandos principales la formulación de planes nacionales o regionales de ordenamiento de recursos hídricos reporta otros beneficios significativos tales como:

a) obligar a una coordinación intersectorial de los usuarios del agua mediante la organización y funcionamiento de comisiones multisectoriales o equivalente para elaborar el plan;

b) generar la ejecución de estudios globales de la oferta de agua integrando estudios parciales o que se encuentran dispersos o incompletos (sobre aguas superficiales y subterráneas principalmente);

c) generar la ejecución de estudios para determinar la demanda de agua y los conflictos para su aprovechamiento para uso múltiple y para diversos horizontes de tiempo;

d) facilitar la ordenación del territorio con fines de desarrollo mediante la identificación y clasificación de las zonas según sus potenciales hidroenergéticos, de producción agrícola bajo riego, y de disponibilidad de agua con fines poblacionales o industriales principalmente;

e) mejorar la eficiencia de las instituciones dedicadas a fomentar el aprovechamiento y la conservación del agua delimitando mejor sus funciones y actividades, evitando consecuentemente la duplicidad de esfuerzos y detectando áreas de trabajo no consideradas previamente;

f) crear conciencia sobre las responsabilidades compartidas del manejo y la conservación de agua, controlar la contaminación, proteger y manejar las cuencas hidrográficas de captación de agua y en general incorporar mayores consideraciones ambientales usualmente poco tratadas a niveles sectoriales.

3. Computadoras, modelos matemáticos y ordenamiento de recursos hídricos

El desarrollo de los modelos matemáticos está íntimamente ligado con el de las computadoras. Veamos como se relacionan ambos al ordenamiento de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe.

/3.1 Cronología

3.1 Cronología del desarrollo de las computadoras y el ordenamiento de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe

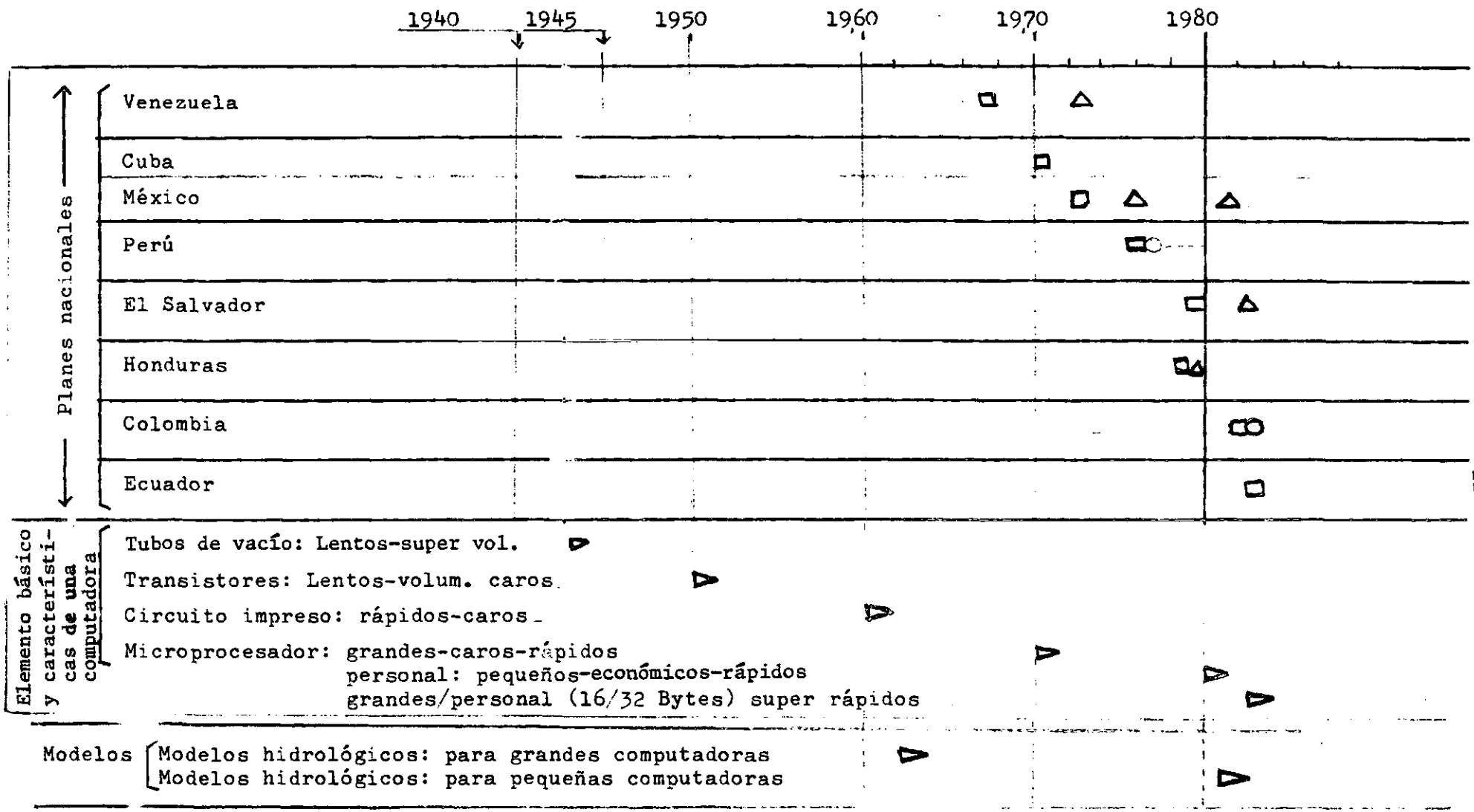
El desarrollo de las computadoras electrónicas ha permitido que el análisis de los procesos hidrológicos arroje resultados cuantitativos más confiables para fines de planificación, uso y operación de los sistemas hídricos. En efecto, comenzando en la década del 60 surgieron numerosos modelos de simulación de una o más partes del ciclo hidrológico como una consecuencia del desarrollo de computadoras electrónicas super rápidas y con gran capacidad de memoria, lo que fue posible gracias a la invención de los circuitos integrados impresos ("chips"). Desde entonces el número de modelos hidrológicos aumenta todos los días porque para cualquier investigador es tentador y fascinante el "jugar" con números y simular los procesos físicos de la naturaleza, traducidos por ejemplo, en una secuencia de ecuaciones matemáticas, cuando tiene acceso y sabe como operar esa maravilla moderna que es una computadora electrónica.

En lo que respecta a los países latinoamericanos aunque no se cuenta siempre con la información numérica necesaria puede afirmarse que la influencia de las computadoras y de los modelos en el desarrollo de sus recursos hídricos ha sido muy significativa particularmente en algunos sectores como el de energía. Así la evaluación completa de los recursos hidroenergéticos de países como Colombia, Ecuador, Guatemala y Perú, ha sido posible gracias al uso sistemático y total de computadoras, empleando en el procesamiento de los datos, modelos tanto propios como adpatados. En cuanto a la planificación integral de los recursos hídricos a nivel nacional, el empleo de las computadoras y de los modelos ha ido incrementándose conforme aumenta el número de países que planifican el agua. Observando la figura 3.1, que presenta la cronología del desarrollo de las computadoras, de los modelos y de la formulación de los planes de agua en América Latina y el Caribe, podría decirse lo siguiente:

a) Venezuela, que fue uno de los primeros países en formular su plan de ordenamiento del agua, lo hizo en una época en que aún el uso de las computadoras era algo limitado por lo lentas y costosas. Se presume que en la actualidad el proceso de actualización y revisión permanente de su plan, estén haciendo uso extensivo de estas herramientas.

/Figura 3.1

Fig. 3.1



LEYENDA

- ▷ Comienza su desarrollo
- □ Preparación del plan
- ● Formulación del plan
- △ Publicación del plan

/b) Los

b) Los países que han introducido fuertemente el uso de las computadoras en la formulación de sus planes en la época de la difusión de las procesadoras electrónicas super rápidas son principalmente México, y recientemente El Salvador. El Perú las ha utilizado principalmente en el modelo prospectivo del Plan Nacional de Ordenamiento de Recursos Hídricos 1/ y en el estudio de aguas subterráneas y para los estudios hidro-energéticos.

c) Colombia y Ecuador que están en pleno proceso de formulación y ejecución de su plan de ordenamiento del agua, sin duda aprovecharán del abaratamiento y gran difusión de las computadoras y particularmente de las micro-procesadoras, para completar sus estudios y para la constante reactualización de aquéllos.

En cuanto a los países que efectuarán su planificación en el futuro es obvio esperar que el procesamiento y análisis correspondiente a sus planes los harán empleando los modelos hidrológicos y las computadoras principalmente en la parte de evaluación de la oferta de agua, que es donde existe más experiencia, y en la que destaca la cuantificación de las aguas de precipitación, de escorrentía superficial, el almacenamiento, las aguas subterráneas, evaluación de los fenómenos extremos sequía e inundaciones, y la calidad del agua, y cuyos modelos matemáticos adaptables se presentan más adelante.

3.2 Ordenamiento de recursos hídricos y uso de computadoras

Las computadoras se usan con gran ventaja en los tres aspectos de la planificación del uso del agua (véase la figura 2.1) como son evaluación de la oferta, evaluación de la demanda y operación de los sistemas de uso del agua.

a) Evaluación de la oferta

Es probablemente en lo que existe más experiencia y mayor cantidad de programas desarrollados. La evaluación de la oferta comprende i) la formación de banco de datos el que debe incluir, además de la colección de datos, programas para confiabilidad y consistencia, métodos para estimar datos que faltan, métodos para extender datos, métodos para transponer datos, métodos para generar datos en lugares donde no existen registros (que es el caso más frecuente cuando se evalúan los recursos hídricos); ii) definición de la variabilidad de los datos en el tiempo para hacer predicciones; y iii) calcular los volúmenes disponibles a nivel regional, y nacional. El capítulo 5 de este trabajo presenta los modelos adaptables para estos cálculos.

1/ Instituto Nacional de Planificación, "Modelo Prospectivo, Informe al Horizonte 1990, COMPLDNORH, Lima, diciembre, 1980.

/b) Evaluación

b) Evaluación de las demandas

Aquí hay que referirse principalmente a los Modelos Prospectivos. En efecto estos modelos son el elemento fundamental para cuantificar el uso del agua en los niveles nacional y regional basados por una parte en la evolución y proyecciones de los coeficientes técnicos para uso del agua y por otra en los planteamientos del plan de desarrollo nacional y en los planes y programas sectoriales. Por lo tanto, se requiere considerar tal como se expresa en el Plan del Perú, "un conjunto de variables económicas demográficas y de disponibilidad y uso de recursos físicos a nivel nacional y de regiones hidráulicas, así como de las componentes sectoriales, de la economía y su participación en la formación del Producto Interno Bruto".1/ En el caso del modelo prospectivo del Perú, él está constituido por dos modelos matemáticos uno llamado "Distribución del Ingreso y Acondicionamiento del Territorio" (DIAT), y el otro "Urbano-Regional" (URRE), y es una "muestra de la importancia que tienen el uso de los modelos matemáticos en la planificación".1/ En el presente trabajo no se ha tratado de numerar los modelos específicos que existan para evaluar la demanda por estar involucrados en ellos aspectos mucho más complejos que el hidrológico.

c) Operación de sistemas de aprovechamiento del agua

Los sistemas de aprovechamiento de agua que son parte de un plan de ordenamiento, deben operar de la forma óptima. Para conseguirlo se recurre al análisis de sistemas que incluye el tratamiento de modelos matemáticos, de simulación y de optimización.2/ También existen muchos modelos matemáticos para tratar problemas de esta clase como es el caso del modelo SSARR que se describe más adelante. También existen modelos para simular todo un sistema de aprovechamiento de las aguas de una cuenca considerando desde derivaciones del río hasta uno o más usos del agua a lo largo del trayecto del curso principal y secundarios, incluyendo aportes al sistema desde aguas subterráneas, u otras fuentes, calidad y preservación del medio ambiente. Un tal modelo es el MITTAMS que también se describe más adelante. Además de estos ejemplos, no se presenta mayor información sobre este tema en el presente trabajo.

1/ Instituto Nacional de Planificación, "Modelo Prospectivo, Informe al Horizonte 1990", Comisión Multisectorial del Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos, Lima-Perú, 1980.

2/ Dourojeanni, Axel, "El análisis de sistemas y la operación de Sistemas Hídricos", Min. de Agricultura, Dirección General de Aguas, Lima-Perú, 1980.

/4. Tendencias

4. Tendencias en el uso de modelos: microprocesadoras e imágenes de LANDSAT

4.1 Las microprocesadoras

Los modelos de simulación más comunes tales como el Stanford Waterhsed Model, el HEC-1, HEC-2, TR-20, SSARR 1/ y otros para las aguas subterráneas como el AQUIFEM del MIT, fueron desarrollados para computadoras muy grandes o super-minicomputadoras (HP-3000) cuyos precios fluctúan entre los 200 mil y varios millones de dólares y por lo mismo su uso es limitado. En los últimos tres años la difusión de las micro-computadoras ha ido en aumento y millones de ellas están en uso ahora en todo el mundo. Es de suponer que ellas tendrán una influencia mayor y creciente en simulación por las siguientes razones:

a) Capacidad de las microprocesadoras

Las primeras micro-computadoras como la APPLE-II y la TRS-80 que usaban elementos (bytes) de 8 bits, cuya velocidad relativa con respecto a otras es la siguiente:

	Velocidad relativa
Microprocesadora de 8 bit	1
Microprocesadora de 16/32 bit	20
Microprocesadora de 32 bit	50
Super-minicomputadora de 32 bit	70
Super-computadora de 32 bit	100

Para comprender el avance de las microprocesadoras veamos algunas comparaciones: 2/

i) En cuanto a rapidez y capacidad las computadoras de mesa con 16/32 bit como la Motorola 68000 son tan rápidas como las super-minicomputadoras de hace 3 años y los nuevos microprocesadores de 32 bit de Hewlet-Packard pueden igualar en capacidad a una super-minicomputadora en actual uso.

ii) En cuanto a costos, una microprocesadora de 16/32 bit que cuesta ahora US$ 5 000 puede hacer el trabajo de una minicomputadora de US$ 50 000 de hace tres años y el de una gran computadora de US$ 250 000 de hace 5 años.

1/ Véase el cuadro 5.1 para significado de estas siglas.

2/ HYDROCOMP, Inc., "Microprocessors in simulation", Simulation Network Newsletter, abril, 1983, Mountain View, California, U.S.A

/Por lo

Por lo que a velocidad y capacidad se refiere, se recomienda como mínimo, para procesar modelos hidrológicos aplicables en ingeniería, el uso de microprocesadoras con elementos de 16/32 bit.

b) Capacidad de interacción gráfica

Las microprocesadoras, tan pronto como aparecieron, incorporaron en su sistema una capacidad gráfica de alta calidad a bajo precio. Esta capacidad es una ventaja para la simulación porque es posible ver inmediatamente la respuesta del sistema que se modela a las condiciones impuestas por el usuario.

c) Mayor accesibilidad

A pesar de que, en general, en todos los países existen grandes computadoras, el uso que hacen de ella los ingenieros es aún muy limitado. Esto es debido tanto a la falta de programas adecuados como a la falta de entrenamiento de los ingenieros en el manejo de las computadoras ya que el aprendizaje toma un tiempo y un esfuerzo que ellos no están dispuestos a sacrificar. Por lo tanto, muchos cálculos hidráulicos e hidrológicos se hacen aún usando tablas, monogramas y en el mejor de los casos pequeñas calculadoras.

Es probable que las microprocesadoras salvarán esta deficiencia. En efecto, ellas son atractivas, pequeñas, portátiles y responden inmediata y directamente al simulador ya que no existe un operador intermedio (como es el caso con las grandes computadoras). El tiempo de aprendizaje para operar una microcomputadora es aún considerable y el desarrollo de los programas es aún dificultoso, pero comenzar es más fácil; además la capacidad gráfica es muy importante ya que, entre otras cosas, acelera el proceso de calibración de los modelos.

De lo expuesto puede deducirse que las microprocesadoras harán posible el uso más extendido de los modelos, ya que a la capacidad que tienen de simular procesos complejos -que antes lo hacían sólo computadoras grandes como flujo de aguas subterráneas, sistemas de distribución de agua potable y otros- se añade el hecho de la disminución general de costos (tanto de los aparatos en sí como de la memoria y almacenamiento) por lo que es de esperar que su empleo se generalizará más o menos rápidamente.

/4.2 Imágenes

4.2 Imágenes de Landsat

Todos los modelos de simulación de cuencas hidrográficas requieren alguna forma de información sobre las condiciones de cobertura y uso del suelo. Las imágenes que capta y envía el Landsat procesadas mediante computadoras se han empleado con ventaja sobre los métodos convencionales para cuantificar los parámetros que miden dichos factores.

El Landsat fue lanzado en 1972 y desde entonces se han realizado varios estudios para evaluar su capacidad para proveer información que permita estimar áreas impermeables y uso general del suelo de las cuencas que se requieren en modelos de simulación del proceso lluvia/escorrentía. Por ejemplo en uno de esos estudios se encontró que para estimar el área total impermeable en una cuenca de 342 km^2, se requirieron aproximadamente 94 días-hombre con métodos convencionales y 4 días-hombre con imágenes del Landsat. Entre los modelos que se han empleado para probar las imágenes del Landsat están el HEC-1, el TR-20 y el STORM.1/

En el caso particular del TR-20 se han encontrado las siguientes ventajas del Landsat:2/

i) El aspecto multitemporal del Landsat permite la selección de las imágenes durante el período del año que uno considere más crítico para el estudio hidrológico.

ii) El formato digitalizado de los datos del Landsat es compatible con los requerimientos de los datos de entrada de las computadoras.

iii) Es posible combinar en una base de datos información sobre suelos precipitación, pendiente, vegetación, cobertura.

El costo comparativo de usar Landsat o los métodos convencionales puede verse en el cuadro 4.1.

1/ a) HEC-1: Modelo de cuencas hidrográficas, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center, Davis California, U.S.A.; b) TR-20: Modelos de cuencas y operación sistemas hidráulicos desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos; c) STORM: Modelo para tratamiento de desagues y escorrentía superficial, desarrollado por el U.S. Corps of Engineers.

2/ R.B. Slack y R. Welch, "Soil conservation runoff curve number estimates from Landsat data", Water Resources Bulletin, Vol. 16, N° 5, octubre de 1980.

/Cuadro 4.1

Cuadro 4.1

COSTOS, METODO CONVENCIONAL Y CON LANDSAT PARA OBTENER INFORMACION SOBRE USO Y CONDICION DE LOS SUELOS a/

Cuenca	Area km^2	Costo procesamiento US$	
		Convencional	Landsat
Tail Creak	31	3 286	b/
Castro Valley	15	519	b/
Pennypack Creek	145	15 966	3 312
Rowlett Creek	354	8 735	3 950
Crow Creek	48	8 540	4 529
Walnut Creek	142	10 000	4 211

a/ Albert Rango, et al., "Effective use of Landsat data in hydrologic models", Water Resources Bulletin, Vol. 19, N° 2, abril de 1983.
b/ Dato no conocido.

Por otra parte también es conocido el uso del Landsat para exploraciones geológicas, incluyendo la presencia de aguas subterráneas, habiéndose encontrado una buena correlación entre la estructura geológica regional y la producción de pozos.1/ Pero hay que tener presente que la información hidrológica y geológica del Landsat debe ser obtenido mediante el análisis e interpretación de imágenes, lo cual debido a su carácter de repetitivo y de cobertura geográfica generalmente muy grande puede hacerse mejor con la ayuda de computadoras de alta velocidad.2/

1/ Keneth E. Foster, et al., "The use of Landsat imagery in grounwater exploration", Water Resources Bulletin, Vol. 16, N° 5, octubre de 1980.

2/ Medardo Molina y Ted Reinchen, "A model for indirect runoff measurement in Wadi Araba and remote sensing by Landsat", Report from Boyle Engineering Corporation to the Hashemite Kingdom of Jordan, Newport Beach, California, julio de 1980.

5. Modelos matemáticos para evaluar la oferta de recursos hídricos

5.1 Generación y adaptación de modelos matemáticos

Se ha visto que el ordenamiento del recurso hídrico tiene que comenzar con un inventario del mismo, lo más completo posible. Existen una gran cantidad y variedad, en uso a nivel mundial, de modelos de computación disponibles para procesar datos -aunque conseguirlos es el cuello de botella del proceso- de inventario de recursos hídricos. Por lo tanto, cuando se necesite un programa de computación para resolver un determinado problema, lo más recomendable es ubicar uno adecuado y adaptarlo. Es verdad que adaptar un modelo desarrollado en otro lugar puede presentar problemas y puede ser necesario invertir bastante dinero y tiempo. Pero esta inversión es minúscula comparada con aquella que se requiere para desarrollarlo desde su comienzo, esto puede tomar muchos años y costar miles de dólares. Tal es el caso, por ejemplo, de los modelos identificados con las iniciales HEC en cuyo desarrollo, desde el momento de la conceptualización hasta hacerlos plena y confiablemente operativos, seguramente se emplearon por lo menos 3 a 4 años requiriéndose miles de horas-hombres y horas-computación. (Véase figura 5.1.) En la actualidad la copia en cinta magnética más los manuales de operación de cualquiera de estos programas pueden conseguirse por unos doscientos a trescientos dólares.

5.2 Descripción y fuentes de modelos matemáticos adaptables para evaluar oferta

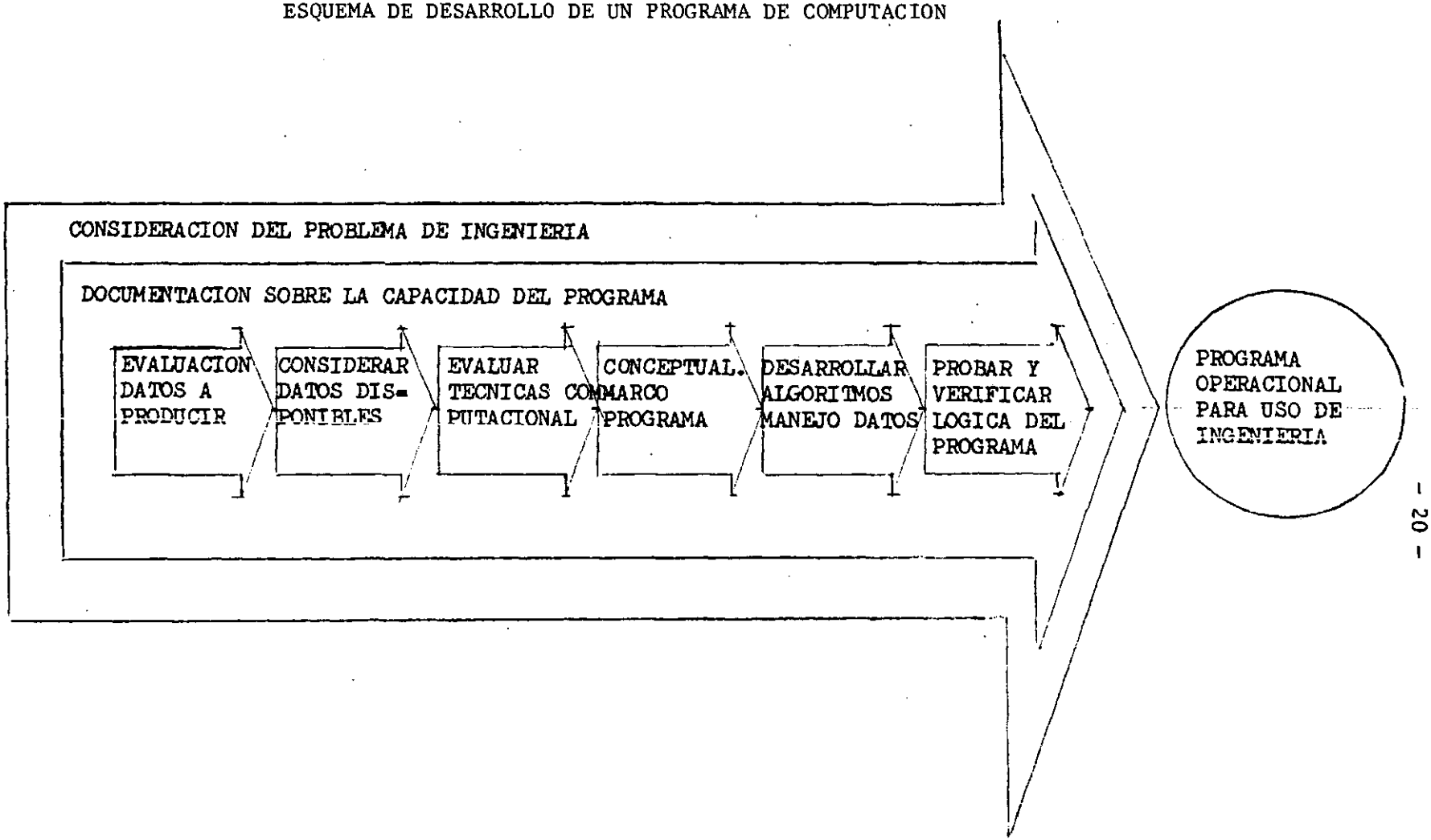
Una de las fuentes más importantes para obtener modelos de computación es la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la que ha hecho un inventario de los modelos hidrológicos de uso más difundido en el mundo y ellos están clasificados en lo que llaman el "HOMS Reference Manual" (HOMS: Hydrological Operational Multipurpose Subprogramme). Este Manual está disponible en casi todos los países del mundo, en los Centros Nacionales de Referencia de HOMS, los cuales, en general, son los servicios hidrometeorológicos de cada país. En aquel inventario se consigna respecto a cada modelo, la siguiente información:

- Objetivos
- Descripción
- Requerimiento de los datos de entrada (input)
- Información de salida (output)
- Requerimientos de operación y restricciones
- Forma de presentación (cinta, tarjeta, listado, etc.)
- Experiencias
- Disponibilidad y condiciones de uso

/Fig. 5.1

Fig. 5.1

ESQUEMA DE DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTACION



Fuente: Augustine J. Fredrich, "Management of Computer Use in Solving Engineering Problems", Proceedings of a Seminar on Computer Applications in Hydrology; The Hydrologyc Engineering Center, Davis (California), U.S.A., febrero 1971.

/En esta

En esta sección se presenta una relación de programas seleccionados del Manual de Referencia HOMS aplicables a cada una de las partes principales de un inventario de recursos hídricos. En primer lugar en el cuadro 5.1 se presenta la lista de los modelos agrupados por elementos de inventario. Luego, se presenta una relación más detallada donde se indica: el nombre original del modelo y junto su código HOMS (al que hay que referirse cuando se hace el pedido) y la fecha de revisión del modelo; el objetivo y la descripción del modelo y el país originario cuyo Centro de Referencia HOMS se encarga de su distribución. En el anexo 1 se encuentran las direcciones de estos Centros.

Luego se presenta otra relación de modelos muy útiles y versátiles, no encontrados en el "HOMS Reference Manual" incluyéndose el originador y su dirección.

Por último, en el anexo 2, se presenta una lista de instituciones y referencias bibliográficas que constituyen fuentes de programas de computación hidrológicos.

a) Modelos para evaluar las precipitaciones

Cuando se hace un inventario de recursos hídricos lo que interesa respecto a la precipitación, es conocer la cantidad y oportunidad de su ocurrencia. La cantidad expresada como una lamina indica el volumen que cae en un lugar determinado. Como quiera que la precipitación se mida en un solo punto de un área geográfica el siguiente problema es estimar la precipitación promedio caída sobre un área geográfica de interes. El otro problema que hay que resolver es la frecuencia con la que se presenta determinada magnitud. Debido a que las lluvias son un fenómeno aleatorio, es necesario definir la distribución de frecuencias con el fin de hacer predicciones y proyecciones en cuanto a su disponibilidad. Los modelos que a continuación se describen pueden ayudar a encontrar la respuesta a estos problemas.

b) Modelos para evaluar la escorrentía superficial

La forma más común de expresar la escorrentía superficial es mediante el caudal o la descarga que tiene el curso principal de la cuenca en la que se produce dicha escorrentía. Lo que interesa de estos caudales o descargas es también su magnitud y la frecuencia de la ocurrencia de una magnitud determinada. Los programas que se presentan a continuación, pueden servir para medir la confiabilidad de la información o datos, para generar datos en lugares donde no existe registro. Este es el problema más común en todos los países latinoamericanos y el Caribe,

/Cuadro 5.1

Cuadro 5.1

INVENTARIO DE RECURSOS HIDRICOS Y MODELOS MATEMATICOS ADAPTABLES, REF. "HOMS" a/

Elemento del inventario	Factor considerado	Modelo adaptable Nombre y/o Código "HOMS"
1. Precipitación	Distribución de probabilidades (gamma)	I26.1.04
	Precipitación diaría: promedio sobre un área	I26.2.01
	Determinación de isohietas y de precipitación promedio sobre un área	I26.3.01
2. Escorrentía superficial	Descarga mensual: prueba de homonegenidad	I73.2.03
	Extensión de series de caudales	I73.2.10
	Simulación de descargas mensuales	HEC-4 J50.2.01
3. Almacenamiento	Síntesis de descargas mensuales y regulación de reservorios	SSARR J05.2.02
	Diseño de la capacidad de un reservorio por medio de simulación aleatoria	K52.2.03
4. Aguas subterráneas	Simulación de un acuífero	J35.3.01
	Cálculo de la depresión del acuífero acusada por pozos bajo diferentes condiciones	K44.1.02

/Cuadro 5.1 (conc.)

Cuadro 5.1 (conc.)

5. Fenómenos Extremos	Análisis de frecuencias de descargas máximas	I81.2.03
	Cálculo de secciones de inundación	HEC-2 J78.3.01
	Evaluación de riesgo de inundación regional	K06.2.02
6. Calidad del agua	Simulación calidad del agua (BOD)	WATQUAL J30.2.01
7. Análisis Precipitación/Descarga	Hidrogramas de crecidas	HEC-1 J20.2.01
	Hidrogramas de sistemas de cuencas	TR-20 J20.3.02

a/ Otros cinco modelos, no contenidos en el HOMS, pueden verse en la página 32.

Cuadro 5.2

MODELOS PARA EVALUAR PRECIPITACIONES

Nombre y número	Propósito	Descripción	País
Rainfall probability processing program. I26.1.04 (enero, 80)	Calcular la probabilidad de que la precipitación exceda cualquier valor específico.	El programa calcula los parámetros de la distribución Gamma empleando varios años de datos de precipitación y calcula la precipitación acumulada	Israel
Daily average areal precipitation by Thiessen method I26.2.01 (febrero, 81)	Calcula precipitación promedio sobre una área geográfica, empleando información disponible, aún escasa. Almacena resultados en discos	La cuenca se representa por un retículo rectangular y la ubicación de la estación es un rectángulo. El programa lee la precipitación asignada a cada estación y calcula el promedio sobre toda el área	Bélgica

/Cuadro 5.2 (conc.)

Cuadro 5.2 (conc.)

Computer drawn areal rainfall and averaging I26.3.01 (marzo, 82)	Determina una red de precipitación a partir de estaciones irregularmente espaciadas; luego dibuja las isoyetas y calcula la precipitación promedio sobre el área	Emplea precipitación total de cada estación que son interpoladas empleando la técnica de Cressman. También se pueden incluir datos para introducir el factor orografía. Requiere 135 K byte IBM 360/65	Australia

por lo que el recurrir a modelos de generación de información es un buen recurso que hay que practicar. Hay que tener presente que cuando se generan datos lo único que se trata es de reconstruir una serie que tenga los mismos parámetros de los datos reales u observados. O sea que si se trata de las descargas mensuales por ejemplo, si asumimos que estas descargas están normalmente distribuidas, lo único que se requiere de los datos que se puedan generar empleando cualquier método es que el promedio y la desviación standard de estos datos sean los mismos que los de los datos observados, dentro de ciertos rangos de confiabilidad por supuesto.

De los modelos que se describen a continuación, el más usado a nivel mundial es el HEC-4 lo que es una ventaja porque eso quiere decir que existe bastante experiencia en su empleo y se pueden generar datos comparables.

c) Modelos para evaluar el almacenamiento

El agua almacenada que se considera en un inventario, es aquella contenida en lagos, lagunas y reservorios artificiales. Los modelos existentes sólo tratan de resolver el problema de operación de reservorios, ya que la estimación del volumen de agua de los reservorios sean naturales o artificiales, es una operación matemáticamente sencilla.

d) Modelos para evaluar aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son una forma muy importante de los recursos hídricos. Prácticamente todos los países de la región las emplean para desarrollar áreas valiosas de su economía entre las que se encuentran agricultura, aprovisionamiento de poblaciones, industrias. Un acuífero es pues un recurso inapreciable y existe la necesidad de emplearlo con el máximo de cuidado y eficiencia. Existen numerosos modelos de aguas subterráneas y todos tienen como finalidad simular el comportamiento del acuífero cuando se le somete a diferentes condiciones de explotación y uso. Los modelos que se indican a continuación y el AQUIFEM que se describe en

/Cuadro 5.3

Cuadro 5.3

MODELOS PARA EVALUAR ESCORRENTIA SUPERFICIAL

Nombre y Número	Propósito	Descripción	País
Testing the homogeneity of monthly discharge time series I73.2.03 (Feb 81)	Compara 2 series de descargas mensuales para detectar anomalías.	Primero se elimina la componente periódica de las dos series y los residuos se transforman en variables reducidas. Luego se aplica una regresión lineal, la prueba de Mann para evaluar las discrepancias que puedan haber entre las dos series. También es posible estimar la descarga mensual promedio para una estación empleando las observaciones en la otra y luego se aplica la prueba de t. Fortran IV	Bélgica
Methods of extending runoff series I73.2.10 (Ene 81)	En caso de que los datos observados sean insuficientes, los parámetros de la escorrentía (promedio, varianza, sesgo) y la curva de distribución, se calculan mediante la extensión de datos.	Cortos períodos de datos se extienden empleando métodos analíticos y gráficos o ambos. El primero emplea análisis de regresión simple o múltiple y el segundo correlación gráfica. Fortran IV.	Rusia
Monthly streamflow simulation (HEC-4) J50.2.01 (Feb 81)	Este programa es un modelo estocástico autoregresivo mensual multivariado que genera secuencias sintéticas de una variable hidrológica y también rellena datos que faltan mediante correlación con otras estaciones	El promedio, la desviación standard y el coeficiente de sesgo de los logaritmos son calculados para cada estación y para cada mes. Cada variable hidrológica es convertida a una variable normalizada empleando una aproximación a la distribución Log-Pearson III. Luego se calculan los coeficientes de correlación cruzada y serial. Programa desarrollado para computadora CDC 6600, pero ha sido usado en otras computadoras de alta velocidad. También existen instrucciones en video.	U.S.A.

/Cuadro 5.4

Cuadro 5.4

MODELOS PARA EVALUAR ALMACENAMIENTOS

Nombre y Número	Propósito	Descripción	País
Streamflow synthesis and reservoir regulation (SSARR) J05.2.02 (Jul 82)	El modelo SSARR simula el sistema cuenca-río-reservorio. Ha sido desarrollado para efectuar simulación hidráulica con fines de analizar la planificación, diseño y operación de obras de control de las aguas y para predicción en manejo y control de ríos.	El modelo combina técnicas de simulación de cuencas que producen flujos superficiales y subterráneos con técnicas de tránsito de flujo en ríos y reservorios. El modelo emplea 12 a 18 coeficientes para la cuenca y 3 para ríos. Se recomienda 5-10 años de registros meteorológicos y de descarga simultánea para calibrar. Se ha empleado una IBM 360/40 de 64 K bytes. Existe una versión para computadoras más pequeñas, llamada COSSARR.	U.S.A.
Design of storage reservoirs by stochastic simulation K52.2.03 (Ene 81)	Programa de computadora para determinar el tamaño de un reservorio para satisfacer una demanda dada y con una seguridad determinada.	El modelo simula el balance de agua del reservorio o reservorios. Se emplean datos históricos de descargas mensuales para estimar parámetros de generación de datos. Se emplean análisis de Fourier y técnica de Montecarlo para remover la componente armónica y para generar datos los que se emplean junto con las demandas mensuales de agua para diferentes niveles de desarrollo socioeconómico. Fortran IV. Requiere 64 K bytes.	Hungría

Cuadro 5.5

MODELOS PARA EVALUAR AGUAS SUBTERRANEAS

Nombre y número	Propósito	Descripción	País
Aquifer simulation system J35.3.01 (Ene 81)	Simulación del comportamiento dinámico de acuífero. Se emplea tanto para determinar parámetros como definir políticas de operación.	El acuífero se divide en una red cartesiana. Las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo subterráneo se resuelven por diferencias finitas. El modelo es bi-dimensional y de flujo no estacionario IBM 370-FORTRAN IV.	Israel
Computation of drawdown of vertical and horizontal partially penetrating wells K44.1.02 (Ene 81)	Cálculo de la depresión del acuífero causado por pozos verticales y horizontales que penetran parcialmente.	Soluciones analíticas, para flujo estacionario y no estacionario, y solución de funciones tridimensionales de depresión para tubos horizontales de drenaje, pozos verticales y colectores verticales. Programado para una calculadora TI-59.	Hungría

/la sección

la sección siguiente, pueden ayudar al planificador a tomar las mejores decisiones cuando se está planificando el uso del agua subterránea, en combinación con las aguas superficiales, que es el caso más recomendable.

e) Modelos para evaluar fenómenos extremos

Se denomina fenómenos extremos, en recursos hídricos, a la ocurrencia de sequías e inundaciones. Ambas ocurrencias causan muchos problemas sociales en los países de la región, ya que se presentan con relativa frecuencia y generalmente nos encuentran bastante desprevenidos. Veamos cúal es la situación de ambos eventos en lo que a modelos se refiere.

i) Sequías. Extensas zonas de México, Perú, Bolivia, Brasil, sufren de sequías más o menos periódicas que causan problemas muy agudos para las poblaciones afectadas. Debido a que el fenómeno en sí es muy complejo, no ha sido fácil definir un tipo de sequía porque la ausencia de suficiente cantidad de agua es diferente para cada sector de la economía de un país. Sin embargo, la sequía que afecta a un sector relativamente menos favorecida de la población son las sequías agrícolas, es decir aquellas que afectan a los cultivos. En países como Perú y Bolivia el problema es grave porque partes importantes de la población subsisten con cultivos de secano es decir con agua de lluvias y una ausencia prolongada de éstas tiene efectos de verdadera catástrofe social. Los modelos matemáticos obviamente no van a resolver estos problemas, pero sí pueden aprovecharse para tareas de predicción de frecuencias y generación de datos de precipitación en base a los cuales se pueden hacer predicciones de sequías y dictar medidas preventivas. La figura 5.2 ilustra el caso de la determinación de las sequías en México.

ii) Las inundaciones. En los momentos presentes las inundaciones han cobrado gran actualidad, desafortunadamente, debido a la magnitud con la que se ha presentado en casi todos los países de Latinoamérica y el Caribe durante estos dos últimos años, siendo el último el que ha causado gravísimos problemas a países como Argentina, Perú, Paraguay, Ecuador, Cuba, Brasil, Honduras, principalmente. En lo que a planificación del recurso hídrico se refiere, en la definición de las inundaciones interesa lo siguiente:

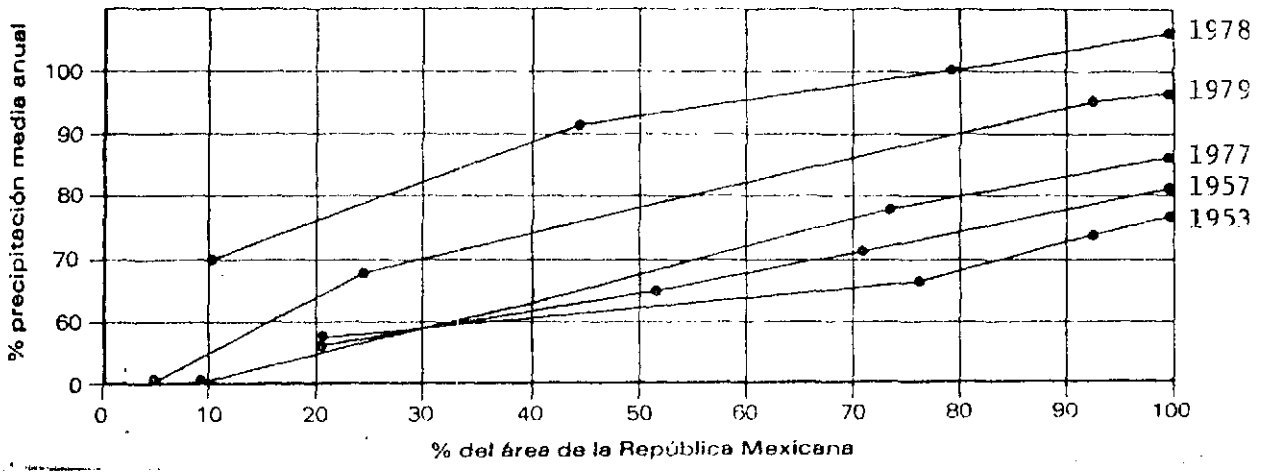
- la relación frecuencia-magnitud de las descargas (o avenidas o crecidas) que producen las inundaciones. En efecto, es importante saber con que frecuencia es de esperar que se produzca una crecida de magnitud dada

/Figura 5.2

Fig. 5.2

GRAFICOS SOBRE LAS SEQUIAS EN MEXICO

(a) Principales sequías ocurridas de 1953 a 1979



(b) Incidencia de las sequías en los últimos 100 años

Alta, mayor de 12 sequías

Media, de 7 a 12 sequías

Baja, menor de 7 sequías

Fuente: Comisión del Plan Nacional Hidráulico, "Plan Nacional Hidráulico 1981", México D.F., 1981.

/porque en

porque en función de ella se hacen los diseños de control de las inundaciones. Para resolver este problema existen gran cantidad de modelos, entre los que destacan aquellos que simulan la relación lluvia/caudal, los que sirven para estimar precisamente el caudal que podría pasar por un punto de un río que sea de interés económico u otro.

- la relación entre el volumen de las crecidas y la superficie o las áreas inundadas, lo que es muy importante conocer con fines de zonificación de áreas inundables con diferentes grados de riesgo. Para resolver este problema, también son muy útiles los modelos matemáticos y hay varios de ellos siendo el más conodico el HEC-2 debido al uso que tiene en muchos países del mundo.

Puede decirse que el problema de las inundaciones está muy bien definido en el ámbito de los modelos matemáticos y se debe hacer uso exhaustivo de ellos cuando se está haciendo el ordenamiento de los recursos hídricos.

f) Otros modelos de uso en recursos hídricos

Además de los modelos presentados existen muchos otros que ejecutan procesos complementarios de un inventario de recursos hídricos. Entre ellos se presenta aquel que sirve para simular la calidad del agua a lo largo de su curso, midiendo la demanda biológica del oxigeno. Este modelo puede emplearse para monitorear la calidad del agua principalmente cuando hay una contaminación puntual.

Entre otros modelos de interés se presentan aquellos que sirven para encontrar descargas y volúmenes de escorrentía en función de las características de una cuenca y de las precipitaciones caídas sobre ella. Estos modelos llamados también "de cuencas", son muy útiles para estimar descargas en lugares donde no existen registros. Aun habiendo registros, sí estos no corresponden a un tiempo lo suficientemente largo como para hacer predicciones, entonces mediante estos modelos, y empleando tormentas de una determinada frecuencia, es posible estimar descargas o caudales de la misma frecuencia. Los registros de descargas, aunque cortos en estos casos aún son muy útiles porque se emplean para calibrar los modelos, es decir para adaptarlos a la cuenca que se está estudiando. Además del STANFORD WATERSHED MODEL, que es uno de los más copletos, se tienen los HEC-1 y el TR-20 que por ser de aplicación más práctica, han alcanzado gran difusión por lo que su uso es recomendable. Como se ha indicado antes, cualquiera de estos modelos puede emplearse en combinación con imágenes de satelite lo que facilita bastante la estimación de los parámetros de la cuenca que intervienen en los modelos.

/Cuadro 5.6

Cuadro 5.6

MODELOS PARA EVALUAR FENOMENOS EXTREMOS

Nombre y Número	Propósito	Descripción	País
Flood flow frequency analysis I81.2.03 (Feb 81)	El programa encuentra las curvas de frecuencia de las descargas anuales máximas que pueden utilizarse para analizar daños potenciales causados por inundaciones.	Las curvas de frecuencia se calculan empleando los puntos de acuerdo a los métodos de Weibull de la mediana o de Hazen y empleando la distribución Log-Pearson III. (Aplicación del Boletín 17A del Water Resources Council de U.S.A.). IBM 360/370, UNIVAC 1100, 35 K bytes. FORTRAN IV.	U.S.A.
Water surface profiles (HEC-2) J78.3.01 (Feb 81)	El programa calcula los perfiles de la superficie de agua para flujos estacionario gradualmente variable de un río de cualquier sección.	El flujo puede ser subcrítico. El perfil de la superficie de agua a través de estructuras tales como puentes, vertederos y alcantarillados, puede ser calculado. Empleado en todo el mundo. Instrucción en video.	U.S.A.
Programas de computación para evaluación de riesgo de inundación regional K06.2.02 (Ene 81)	Conjunto de programas de computación para usar exhaustivamente datos de descarga y de precipitación que existan en una zona homogénea hidrológicamente para la cual sea necesario evaluar los riesgos de inundación o la ocurrencia de una descarga de frecuencia dada.	Los programas permiten al usuario: a) definir la longitud de registro mínimo requerido; b) rellenar datos de descarga que falten, empleando datos de precipitación; c) ajustar la distribución extrema tipo I a los datos y hacer prueba de Kolgomov-Smirnov; d) regionalizar la distribución de valores extremos empleando el método del índice de inundación; e) estimar el riesgo o período de retorno para una avenida dada en todas las secciones de interés en la región.	OMM

/Cuadro 5.7

Cuadro 5.7

MODELO PARA EVALUAR CALIDAD DEL AGUA

Modelo	Propósito	Descripción	País
Modelo de simulación de calidad del agua (Programa WATQUAL) J30.2.01 (Ene 81)	Calcula los perfiles de oxígeno disuelto (DO) en los ríos, cuando el agua de este río está sujeto a cargas de material de desecho que tiene demanda bioquímica de oxígeno (BOD)	El núcleo del modelo es el algoritmo de tránsito de contaminante, el cual está basado en la formulación clásica de Streeter-Phelp de la relación en el flujo del DO y del BOD. Para la simulación el río se divide en tramos.	Canadá

Cuadro 5.8

MODELOS DE SISTEMAS HIDRICOS A NIVEL DE CUENCA

Hidrograma de crecidas (Flood hydrograph package (HEC-1)) J20.2.01 (Feb 81)	El programa calcula hidrogramas de crecidas que se emplean en el diseño y planificación de sistemas de control de avenidas.	La descarga de las cuencas son calculadas empleando los cuatro procesos de escorrentía, tránsito, suma de hidrogramas y derivaciones. Los hidrogramas se calculan con datos sobre precipitación, índice de pérdida, hidrograma unitario u onda cinemática y flujo base.	U.S.A.
Programa de computadora para formulación de proyectos (TR-20) (Computer program for project formulation (TR-20)) J20.3.02 (Feb 81)	El programa permite el análisis hidrológico de cuencas en condiciones presente y bajo varias combinaciones de cobertura y uso del suelo y diferentes condiciones y modificaciones del sistema de conducción del agua, empleando el dato de una tormenta de frecuencia dada.	El TR-20 genera hidrogramas de escorrentía superficial producidos por una precipitación-tormenta empleando un hidrograma unitario, el área de drenaje, tiempos de concentración y los números de las curvas de escorrentía (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Contiene instrucciones para desarrollar, encauzar (tránsito), sumar, almacenar, derivar, o dividir los hidrogramas, durante la conducción de las aguas desde sus nacimientos hasta una salida dada.	U.S.A.

/Cuadro 5.9

Cuadro 5.9

OTROS MODELOS

Nombre modelo	Descripción	Originador
Entrega de sedimentos (Sediment delivery (SEDEL))1/	El modelo estima la producción de sedimento en una cuenca hidrográfica, calculando la erosión laminar mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), tipo de erosión en el curso de agua. Hace el encauce a través de almacenamientos existentes o propuestos, calcula sedimentación de reservorios. Programa en FORTRAN y requiere 32-K de memoria.	R.C.Boyce, 269 Federal Center Bldg. Hyatsville, MD.20782 U.S.A.
Modelo de precipitación horaria 1/	Modelo estocástico de generación de datos para producir series de precipitación horaria acumulada en un punto. También se simula intervalos de tiempo seco por medio de una distribución exponencial. La intensidad y distribución de la lluvia dentro de la tormenta se modela empleando una distribución log-normal. El programa está en FORTRAN y requiere 120-K de memoria.	Robert N.Eli, Thomas E. Croley, Department of Civil Engineering, West Virginiva Univ., Morgantown, WV 26506, U.S.A.
Modelo de generación de precipitación diaria 1/	El modelo genera precipitación diaria en lugares múltiples dentro de una área o cuenca, que tiene las mismas propiedades estadísticas que precipitaciones observadas. El programa está en FORTRAN IV y requiere 32-K de memoria.	C.W. Richardson U.S. Department of Agriculture, P.O. Box 748, Temple, Texas 76501 U.S.A.
Statistical analysis of hydrologic critical droughts (sequías)	Este modelo evalúa la sequía crítica bien en la forma de sequía de la más larga duración o bien en la forma de la suma de déficit máximo. Considerando un proceso de Markov de un período ("lag") se encuentra la función de distribución acumulada de la sequía más prolongada y de la suma máxima de los déficit. Este modelo también puede resolverse sin computadora.	Zekai Sen Prof. Civ.Eng.Dept. Teknik University Istambul, Turquía
AQUIFEM (Aguas subterráneas) (Feb 80)	AQUIFEM-1 es un modelo de elementos finitos bidimensional para simular el flujo subterráneo. El modelo es sumamente versátil y permite analizar y evaluar diferentes esquemas de desarrollo de aguas subterráneas, mediante el examen de los efectos de diferentes alternativas de planificación y/o políticas de desarrollo bajo diferentes asumpciones sobre localización de pozos, demandas, recargas, etc. También pueden examinarse las cargas piezométricas, la depresión de las napas y los flujos hacia y desde lagos y ríos. El modelo resuelve problemas de napas libres y confinadas, flujo permanente y variado.	Dept. of Civil Engineeri Massachussetts Institut of Technology, Boston, Ma. U.S.A.

1/ American Society of Agricultural Engineers (ASAE), "Hydrologic modeling of small watersheds". St. Joseph. Michigan. 1982.

(Cont.)

Cuadro 5.9 (Cont.)

Nombre Modelo	Descripción	Originador
MITTAMS	MITTAMS es un modelo de simulación que usa incrementos de tiempo largos para evaluar las consecuencias hidrológicas y económicas de varios planes de desarrollo de las aguas superficiales de una cuenca hidrográfica. Especialmente el modelo puede estimar el impacto futuro de varios sistemas que incluyen áreas de irrigación, reservorios, plantas hidroeléctricas, derivaciones y aprovisionamiento de agua potable y agua para uso industrial que existan o que estén siendo considerados para su implementación en varios lugares de una cuenca. Ver Fig. 5.3.	Massachussetts Institute of Technology (MIT), y TAMS Engineering and Architects TAMS Building 655 Third Ave. New York, New York 10017 U.S.A.

/Fig. 5.3

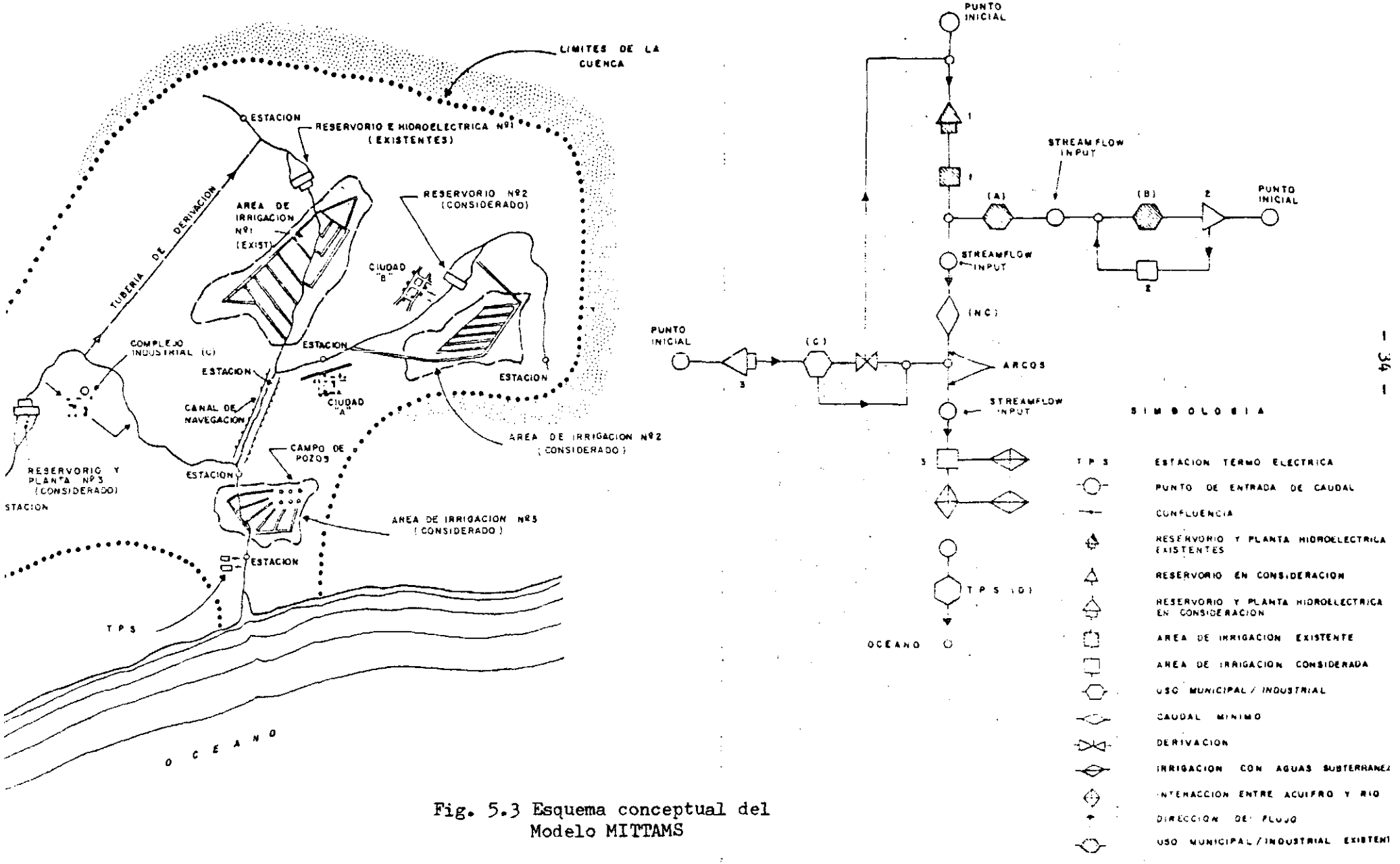


Fig. 5.3 Esquema conceptual del Modelo MITTAMS

6. Empleo de modelos en los planes de agua en América Latina y el Caribe

6.1 Planes nacionales

En el cuadro 1.2 se han presentado los países que tienen un plan nacional del agua. Por ser los más recientes, es de suponer que en México y El Salvador hayan hecho amplio uso de programas de computación para el procesamiento de sus datos. El informe del Plan de México (Anexo 2: "Disponibilidad de agua y suelo") no indica qué metodología se empleó para el procesamiento de datos y en el Plan de El Salvador los detalles del método para evaluar los recursos hídricos se encuentran en el Documento Básico N°3 (no disponible durante la preparación de este trabajo).

Los términos de referencia de los planes de Colombia y Ecuador señalan específicamente que se hará uso de modelos para la evaluación del agua disponible. Los planes de Venezuela y Perú que están en proceso de ejecución y actualización permanente están haciendo sin duda uso de programas de computación, aunque no se tiene información de la amplitud de aquél.

6.2 Planes sectoriales

En este aspecto el panorama sólo es claro en el sector energía. Así en los países que tienen un plan nacional hidroeléctrico, el organismo responsable cuenta casi siempre con un banco de datos hidrológicos y con una computadora para el procesamiento de datos, probablemente debido a la mayor capacidad financiera de las empresas de hidroenergía.

En todos los casos observados cada organismo encargado de los análisis hidrológicos ha elaborado sus propios modelos, principalmente para:

- manejo de datos básicos
- reconstitución de secuencias anuales de precipitación
- determinar relaciones precipitación-escorrentía (modelos de sistemas hídricos a nivel de cuencas)
- determinar las descargas máximas instantáneas
- determinar las descargas de sedimentos
- determinar las láminas de evaporación.

Entre los modelos de uso generalizado empleados en esta clase de estudios se encuentra el HEC-4 adaptado y modificado en el Perú para uso en minicomputadora.1/

1/ República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Evaluación del potencial hidroeléctrico nacional, vol. XI, pp.3-14, Lima 198...

/Probablemente los

Probablemente los planes hidroeléctricos de Ecuador 1/ y Perú han sido los que han hecho uso más completo de modelos debido a que todo el procesamiento de sus datos se ha hecho en computadora. Lo mismo puede decirse del inventario hidroeléctrico, pues se indica que el procesamiento de datos se hizo empleando modelos matemáticos.

Otros países como Colombia y Guatemala que así mismo han realizado un inventario completo de sus recursos hidroenergéticos, también pueden considerarse como fuentes de modelos matemáticos para procesamiento de datos hídricos.

Por otra parte, se ha observado que, en general, el uso de modelos matemáticos en América Latina y el Caribe es aún muy limitado, sospechándose que esto se debe a:

i) falta de información sobre la disponibilidad de modelos;

ii) dificultad de acceso a los centros de cómputo;

iii) costo elevado de los servicios de los centros de cómputo;

iv) déficit de personal entrenado;

v) falta de datos de base que justifiquen el uso de una computadora.

Es de esperarse que los obstáculos ii) al iv) puedan superarse con la difusión de las microcomputadoras, pero aún quedaría por desarrollar el adecuado conjunto de programas (software) hidrológicos para tales computadoras.

7. Conclusiones y recomendaciones

1. El ordenamiento de los recursos hídricos representa para los países que lo han emprendido, la posibilidad de utilizar mejor el agua. Aquel ordenamiento les representa el conocimiento pleno de su potencial en agua, la evaluación y cuantificación de las demandas de todos los sectores socioeconómicos del país compenetrándose en sus necesidades presentes y futuras, y la compatibilización de estas ofertas y demandas en función del desarrollo global del país. Ordenamiento pues, significa, conocimiento, previsión, preparación, decisión y esas son ventajas que no se encuentran cuando existe ausencia de un plan. Puede decirse que afortunadamente, entre los países de Latinoamérica y el Caribe existe conciencia de estas ventajas.

2. Este proceso de ordenamiento de los recursos hídricos puede ser desarrollado con ventajas si se recurre al uso de las computadoras y a los modelos matemáticos.

1/ República del Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Electrificación, "Programas computacionales en los estudios hidroenergéticos del plan maestro de electrificación", Quito, diciembre 1982.

/En efecto

En efecto, estas herramientas permiten entre otras cosas:

- manipular gran cantidad de datos evaluando su grado de confiabilidad, rellenando lagunas, generando nueva información con una asombrosa rápidez y precisión;
- conformar banco de datos de fácil accesibilidad y de amplia cobertura geográfica;
- simular sistemas hidrológicos e hidráulicos con gran facilidad y exactitud, tanto para generar información como para optimizar la operación de dichos sistemas, como una función de la demanda.

3. Existen en uso, a nivel mundial, un gran número de programas de computación y modelos matemáticos para resolver prácticamente cualquier problema referente a cualquiera de las partes de un proceso de planificación de los recursos hídricos. Estos programas y modelos cuyo costo de desarrollo es muy alto, están disponibles a muy bajo costo y son en general adaptables a las condiciones particulares de un país, una región o de una situación o problema. Por lo tanto, cuando se tiene ante sí un problema de una magnitud tal que requiera el uso de una computadora, lo mejor es dirigirse a la fuente del programa adecuado, adquirirlo y adaptarlo. Hay que indicar que existen más programas y modelos para los cálculos concernientes a la oferta de agua que aquellas para resolver los problemas de evaluación de demandas y operación de sistemas hidráulicos.

4. El uso de computadoras y de modelos matemáticos en el sector de recursos hídricos en América Latina y el Caribe es en su conjunto aún bastante modesto. A pesar de que todos los países cuentan con grandes y modernas computadoras, su uso por los ingenieros hidráulicos está limitado por falta de información y dificultad de acceso a los centros de computación.

Por otra parte, hay que señalar que en la mayoría de los países que cuentan con algún centro de procesamiento de datos hídricos, es notable el ingenio y creatividad del personal profesional y técnico para crear software, o sea programas de interacción con las máquinas.

5. Se espera que el uso de modelos matemáticos en el procesamiento de datos hídricos y en la simulación y optimización de sistemas hídricos va a adquirir un gran impulso debido al abaratamiento de las computadoras principalmente en la forma de microcomputadoras de mesa o personales las que costando hoy alrededor de cinco mil dólares pueden hacer el mismo trabajo de una computadora de hace cinco años que costaba doscientos cincuenta mil dólares.

/6. Por

6. Por lo tanto, ha llegado el tiempo de considerar la posibilidad de dotar a cada oficina administradora de las aguas, como un distrito de riego, por ejemplo, de su propia microcomputadora, con lo cual se puede estar seguro que el manejo y operación de los sistemas de uso del agua podrían ser más eficientes e incluso más agradables.

7. Conviene que en cada país se forme un banco de programas relacionados con el aprovechamiento de los recursos hídricos. Aunque esto pueda ser difícil al comienzo, hay que considerar las ventajas y la posibilidad de intercambio de conocimientos y experiencias entre los profesionales del país. Posteriormente, hay que pensar en un banco de programas y modelos a nivel latinoamericano, lo que sería un caso concreto de cooperación horizontal con todas las ventajas que ella implica.

8. La combinación computadora-imágenes del Landsat es muy útil para procesar datos y evaluar una serie de factores relativos a los recursos naturales. Ningún país debe descuidar el desarrollo de las técnicas relacionadas con la utilización de estos instrumentos, por lo que es muy recomendable que se consideren los recursos necesarios para adquisición de equipos y para entrenamiento del personal necesario.

9. Con el avance de la ciencia de la computación, como la elaboración de programas de interacción hombre-máquina, es posible ahora preparar personal capaz de operar microprocesadoras y trabajar con modelos matemáticos relativamente complejos en una o dos semanas de instrucción. Por ejemplo para ser capaz de trabajar con cualquiera de los modelos HEC, basta una semana de instrucción intensiva. No se necesita saber programación, aunque es deseable, para utilizar cualquiera de los modelos desarrollados en recursos hídricos. Por lo tanto, una institución del Estado como un Ministerio por ejemplo, puede capacitar económica y muy rápidamente personal para trabajar con modelos y computadoras.

10. Conforme recomiendan los expertos, al adquirir una microcomputadora el factor más importante a considerar, además del precio, es la disponibilidad de "software". En este sentido la microcomputadora que ofrecería más ventajas es la APPLE, para la que es posible encontrar programas para resolver cualquier tipo de problemas. La parte básica de una APPLE II-Plus cuesta ahora alrededor de mil dólares. Sin embargo, hay que señalar que ellas sirven sólo para problemas relativamente sencillos y en los que la velocidad de procesamiento no sea un factor importante. La mejor computadora como para una oficina del Estado, como por ejemplo una Dirección General, o un Proyecto Especial, sería como mínimo una computadora Hewlet-Packard serie 2000, que cuesta alrededor de 7 000 dólares.

/11. Las

11. Las precipitaciones en muchas partes de Latinoamérica y el Caribe en este último año han superado en muchas veces el llamado promedio normal. Por otra parte, en muchas otras regiones persistentes sequías imponen grandes sufrimientos a sectores ya empobrecidos de las poblaciones. Esa situación debería hacernos pensar que en el procesamiento de datos y en el análisis de nuestro medio ambiente debería ponerse más énfasis en la comprensión de los fenómenos extremos. Muchas veces nosotros asignamos demasiada importancia a los "promedios anuales" olvidando que los datos hidrometeorológicos representan a procesos continuos en los que los extremos pueden tener mayores consecuencias que dichos promedios.

12. Conviene también señalar que ni los modelos ni las computadoras por sí solas pueden resolver los múltiples problemas que el uso del agua nos plantea. Es el hombre en última instancia el elemento más importante en el proceso de ordenamiento de los recursos hídricos, sobre todo por su enorme influencia en el crecimiento de la demanda de este recurso y en la buena operación de los sistemas ya construidos.

/ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1

CENTROS NACIONALES DE REFERENCIA HOMS 1/

Australia
Australian Water Resources Council
Box 5
Canberra, A.C.T. 2600

Bélgica
Institut Royal Meteorologique
Section d'Hydrology
3, Avenue Circulaire
1180 Bruxelles
Att. Dr. F. Bultot

Canadá
Inland Waters Directorate
Environment Canada
Ottawa, Ontario K1A OE7
Att. Dr. W.Q. Chin

Hundría
Hydrographical Institute
Research Center for Water Resources Development (VITUKI)
H-1453 Budapest, Pf.27
Att. Dr. L. Goda

Israel
Hydrological Service
P.O. Box 6381
Jerusalem 91060
Att. The Director

Organización Meteorológica Mundial
The Secretary-General
World Meteorological Organization
Case Postale N° 5
CH-1211 Geneve 20,
Suiza

Rusia
USSR State Committee for Hydrometeorology and
Control of Natural Environment
12 Pavlik Morozov Street
Moscow 123376

U.S.A.
National Weather Service
(Hydrology) (W2x2)
Silver Spring, Maryland 20910
Att. Mr. Allen Flanders

1/ Actualizado marzo de 1982.

Anexo 2

OTRAS FUENTES DE PROGRAMAS DE COMPUTACION APLICADOS A RECURSOS HIDRICOS

a) Instituciones

1. Hydrologic Engineering Center
   U.S. Army Corps of Engineers
   609 Second Street
   Davis, California 95616
   U.S.A.

2. Soil Conservation Service
   U.S. Department of Agriculture
   Central Technical Unit, Room 269
   Federal Building
   Hyattsville, MD 20782
   U.S.A.

3. Hydrocamp Inc.
   201 San Antonio Circle, Suite 280
   Mountain View, California 94040

4. National Weather Service
   Hydrologic Research Laboratory
   Silver Spring, MD 20910

5. U.S. Geological Service
   Water Resources Division
   Reston, VA 22092
   U.S.A.

6. U.S. Department of the Interior
   Bureau of Reclammation
   Engineering and Research Center
   P.O. Box 25007
   Denver, Colorado 80225
   U.S.A.

7. International Ground Water Modeling Center
   Holcomb Research Institute
   Butler University
   Indianapolis, IN 46208
   U.S.A.

8. River Planning Division
   River Bureau
   Ministry of Construction
   2-1-3 Kasumigaseki
   Chiyoda-Ku
   Tokyo, Japón

9. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH)
   Centro de Informática Hídrica
   Casilla de Correo 23
   Aeropuerto de Ezeiza
   Buenos Aires, Argentina

b) Referencias

1. Croley, Thomas (1977) "Hydrologic and Hydraulic Computations on Small Programmable Calculators"
   Iowa Institute of Hydraulic Research
   The University of Iowa
   Iowa City, IA 52242
   U.S.A.

   Nota: Este es un manual de programas e instrucciones diseñado para once calculadoras programables: HP-25, HP-25C, HP-55, HP-65, HP-67, HP-97, SR-52, SR-56, TI-57, TI-58 y TI-59. Más de 870 programas.

2. International Association of Hydraulic Research (1978), "Information Exchange on Computer Programs"
   International Association of Hydraulic Research
   Oude Delft 95, Holanda

3. Apple, Charles A., Bredehoeft, John D. (1976), "Status of Groundwater Modeling in the U.S. Geological Survey" (Circular 737)
   U.S. G.S. Water Resources Division,
   Reston, VA 22092
   U.S.A.

4. Jenning, Marshall E., Yotsukura, Nobuhiro, (1979) "Status of Surface Water Modeling in the U.S.G.S.", (Circular 809)
   U.S.G.S. Water Resources Division
   Gulfcoast Hydroscience Center
   NSTL Station, MS 39529
   U.S.A.

5. Harza Engineering Company, (1977) "Harza Services Related to Mathematical Models in Water Resources Planning and Management",
   Harza Engineering Company
   150 S. Wacker Dr.
   Chicago, IL 60606