

## EL DESARROLLO DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA EN HIDROLOGÍA

Pedro C. Fernández

INA-CONICET, Infanta M. de San Martín n° 640 – (5500) Mendoza-Argentina  
E-mail: pfer@itcsa.net

### Resumen

Se hace una referencia breve a la historia y el desarrollo de las ciencias del agua para ligar esto con la hidrología moderna y finalmente con la modelación matemática como herramienta fundamental de la hidrología del Siglo XXI. La modelación matemática en hidrología tiene gran importancia en la interpretación de las interacciones dinámicas producidas entre los sistemas climáticos, terrestres, edafológicos e hidrosféricos. Se presentan brevemente dos casos reales uno en la cuenca del Río Limay en Argentina y otro en el Río Adige en Italia.

*Palabras clave:* hidrología, modelación matemática, historia de la hidrología, presa de Alicurá, daños en el Adige.

### Abstract

**The development of mathematical models in hydrology.** A reference is made in relation with the history and development of the science of water and the hydrology with emphasis in the use of this tool in the hydrology of the XXI century. The use of mathematical models in hydrologic engineering is of paramount importance in the interpretation of the interaction between the climatic and hydrologic factors. Two study cases are presented: one on the Limay River in Argentina and one for the evaluation of flood damage in the Adige Basin in Italy.

*Keywords:* hydrology, mathematical models, history of hydrology, Alicura dam, Adige basin.

### Introducción

La Hidrología es la ciencia que estudia la disponibilidad y distribución del agua sobre la tierra. Es decir es la ciencia que trata de interpretar fenómenos naturales involucrados en el ciclo hidrológico y principalmente el ciclo de la escorrentía, o sea la transformación de precipitación (lluvia-nieve) en escorrentía superficial y subterránea.

En la actualidad la Hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los recursos hídricos, y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos de ingeniería que tienen que ver con suministro de agua, disposición de aguas, drenaje, protección contra la acción de ríos. De otro lado, la integración de la Hidrología con la Ingeniería de Sistemas ha conducido al uso imprescindible del computador en el

procesamiento de información existente y en la simulación de ocurrencia de eventos pasados y futuros, es decir en la modelación matemática. [4]

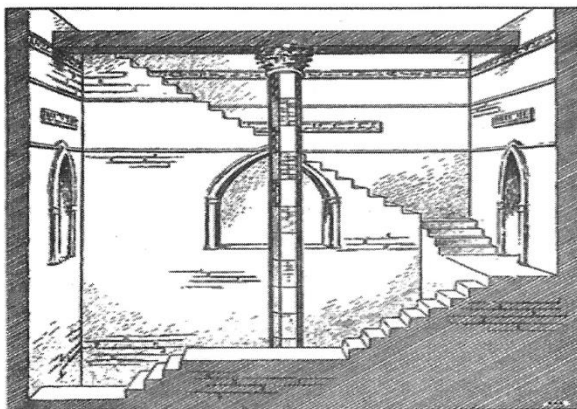
### Un poco de historia

Desde el principio las civilizaciones han estado siempre ligadas al agua, por ello no es ninguna sorpresa que las evidencias de grandes civilizaciones antiguas se han encontrado a lo largo de las márgenes de ríos. El Tigris y el Eufrates en la Mesopotamia, el Nilo en Egipto, el Indus en la India, el río Amarillo en China, el Tiber en Roma. Por cierto que también existieron grandes civilizaciones que dependieron más de las aguas de lluvias, como la antigua Grecia o aquellas que usaron también fuentes de aguas subterráneas de vertientes como los Persas. Los Egipcios hicieron mediciones de los niveles de las inundaciones del

Nilo, desde 3000 años antes de Cristo y las relacionaron con predicciones sobre las condiciones de vida en los meses siguientes y para ello construyeron estructuras especiales llamadas "Nilómetros". Una de las más famosas es la de Roda. Plinio el viejo nos cuenta la relación entre los niveles que alcanzaba el río y lo que se podía esperar para las condiciones de vida de la temporada siguiente. (Figs. 1 y 2) [1].

En relación con el conocimiento del proceso llamado ciclo del agua o ciclo hidrológico no pocos pensadores de la antigüedad hicieron especulaciones sobre el mismo. En la civilización occidental en Grecia los primeros estudios son los de Aristóteles, (nacido en la Macedonia en el 385 antes de Cristo) quien estableció conceptos sobre el ciclo hidrológico, pero con algunos criterios erróneos. Fue Teofrasto discípulo y continuador de Aristóteles, quien describió correctamente el ciclo hidrológico y dio explicaciones sobre la formación de las nubes y las precipitaciones [10].

La civilización Romana marca un hito fundamental en la práctica de las construcciones hidráulicas basadas en criterios empíricos más bien de tipo constructivo. Los acueductos Romanos son considerados una de las maravillas de la ingeniería de la antigüedad. Por ejemplo el acueducto de "Agua Marcia" (construido 140 años antes de Cristo) tenía 60 km de longitud de los cuales 50 eran galerías subterráneas y 10 galerías sobre arcos. Cuatrocientos años después de Cristo, Roma era abastecida por 14 acueductos que se originaban en manantiales, aguas subterráneas y en el río Tiber y suministraban agua corriente a



NILOMETRO DE RODA (Reconstrucción)  
Cortesía de la Oficina de Prensa de la Univ. de California.

Fig. 1. Nilómetro de Roda (Reconstrucción) cortesía de la Oficina de Prensa de la Universidad de California.

11 termas, 2000 fuentes y 926 casas particulares. Las termas tenían provisión de agua fría y caliente y baños de vapor. Tenían además en Roma un completo sistema de cloacas. Fueron grandes ingenieros los romanos y también hicieron importantes contribuciones sobre métodos para explotar acuíferos [2].

Si de acueductos se trata, en Nínive, la capital de Asiria (700 años antes de Cristo) se construyeron acueductos, que funcionaban adecuadamente, con longitudes de 15 km y llevaban aguas claras para palacios y huertas provenientes de ríos de aguas cristalinas, al no poder usar para fines de bebida las aguas con sedimentos del Río Tigris [1].

Desde el punto de vista científico una de las contribuciones más importantes a las ciencias del agua en la antigüedad fue la de Arquímedes [9].

**Arquímedes** (287-212 antes de Cristo) nacido en Siracusa (Sicilia) fue el creador de la hidrostática y estableció correctamente el princi-



CALIBRACION SOCIAL DE PLINIO "EL VIEJO"  
SEGUN LECTURAS DE NILOMETRO

Fig. 2. Calibración Social de Plinio "El Viejo" según lecturas del Nilómetro de Roda.

pio de la flotación de los cuerpos (principio de Arquímedes). Realizó experiencias relacionando el peso específico de metales (oro y plata) con el volumen de agua que desplazaban al ser sumergidos. Sus principios fueron demostrados, mas detalladamente luego por Galileo 17 siglos después [10].

El periodo mencionado y hasta el año 1400 después de Cristo, poco se adelanto en el avance de estas ciencias. Las fundaciones de las grandes Universidades a fines de la Edad Media como Bologna, Padua, Salamanca, entre otras, inició un periodo diferente. Durante el Renacimiento se produce un cambio gradual desde los conceptos puramente filosóficos de la hidrología hacia la ciencia de la observación, solo mencionarse algunos nombres [1].

**Leonardo da Vinci** (1452-1519). Expresó conceptos de la ley de continuidad y del flujo del agua en canales y sugiere diseños de máquinas hidráulicas. Hace los primeros ensayos de medición de la velocidad del agua en canales. Los escritos de Leonardo, contienen más referencias de la hidráulica que de cualquier otra materia. Con él empieza el método experimental.

**Galileo Galilei** (1564-1642). Estimula los estudios de hidráulica experimental, defendiendo y perfeccionando matemáticamente las teorías de Arquímedes sobre flotación de los cuerpos y refuta la teoría de Aristóteles.

A partir de 1600, el desarrollo de las ciencias del agua fue más importante en hidráulica con grandes avances en la faz experimental, lo que permitió formular leyes que dieron muchas de las bases de la hidráulica moderna, en lo que hace al movimiento del agua en canales, tuberías y en flujo subterráneo, nombres como: Torricelli, Mariotte, Pascal, Newton, Bernoulli, Manning, Darcy, Reynolds, Saint-Venant y muchos más, que con métodos experimentales, que hoy podrían considerarse infantiles, intuyeron leyes geniales.

En hidrología, entre 1600 y 1700 se intensifica el periodo de mediciones y el desarrollo de aparatos mas perfeccionados como pluviógrafos basculantes y correntómetros para medir lluvias y velocidades del agua en ríos y canales. Para finalizar con esta referencia y por la trascendencia que tuvieron en la medición de fenómenos naturales me referiré a dos investigadores:

El naturista francés **Pierre Perrault** (1608-1680) midió sistemáticamente la lluvia y la escorrentía. Hizo sus estudios en la cuenca del río Sena y concluyó que alrededor de una sexta parte del agua que cae como lluvia y nieve es suficiente para generar el caudal del río.

El astrónomo inglés **Edmond Halley** (1656-1724), el descubridor en 1682 del gran cometa que lleva su nombre, realiza entre 1686 y 1715 importantes estudios sobre evaporación. Realiza durante 15 años, estudios de evaporación en el Mediterráneo que aclaran los conceptos del ciclo hidrológico en relación con la evaporación del agua en los océanos cerrando entonces el eslabón que faltaba para explicar “**el gran fenómeno del equilibrio de los mares**”, (los océanos producen el 90% de la evaporación en el globo terráqueo).

#### *La Hidrología Moderna*

A partir de principios del siglo XX y mas específicamente a partir de los años 30 la disponibilidad de datos hidrométricos y climáticos se hace más evidente y eso fue generando un acopio de información que estimula a los hidrólogos a usar métodos estadísticos para su interpretación y extrapolación. La existencia de datos estimula a los hidrólogos al uso de la Estadística lo que va haciendo de la hidrología una ciencia menos descriptiva y más cuantitativa, sin dejar de lado la importancia de la descripción detallada de cuencas [4].

A partir de 1930 y hasta 1970, aproximadamente se dan las bases de la hidrología científica. Este y otros desarrollos fueron trascendentes en este período que es de una gran riqueza. Los aportes de organismos de Estados Unidos, de Europa, e Internacionales ligados a estudios hidráulicos, hidrológicos, geológicos y agronómicos fueron realmente notables. Para el avance tecnológico que realmente marcó un antes y un después en la evolución de hidrología científica, fue la incorporación de la computación digital. Parangonando con el desarrollo de la hidráulica, se puede decir que la computadora digital fue para la hidrología lo que el laboratorio de modelos físicos fue para la hidráulica en los siglos 18, 19 y 20. Significó su lanzamiento a la posibilidad de simular mediante modelos matemáticos, condiciones y situaciones de eventos naturales cuya secuencia y magnitud no necesariamente se hayan registrado en el pasado, es decir el equivalente a la investigación que en la hidráulica se hace con el modelo físico.

#### *Modelos Matemáticos en Hidrología*

El término Modelo Matemático se puede definir como una representación virtual, simplificada del mundo real. Cuando el modelo se basa en algoritmos matemáticos es un modelo matemático y si representa etapas del ciclo hidrológico, es un **Modelo Matemático Hidrológico** [4].

El principio de la modelación matemática de cuencas hídricas se puede considerar a partir del Hidrograma Unitario de Sherman en 1932 y de los hidrogramas sintéticos de Snyder (1938) y Clark (1945) así como los algoritmos para la estimación de la evapotranspiración de Pennan en 1948. Este proceso se aceleró paralelamente al desarrollo de la computación digital en la década del 60.

Las décadas del 60 al 80 fueron testigos de la revolución digital y ella hizo posible la integración de diferentes componentes del ciclo hidrológico (superficial y subterráneo) consiguiendo simulaciones virtuales no solo de eventos de crecientes como son los desarrollos mencionados sino de las simulaciones continuas que permitieron reproducir el comportamiento de un río por meses y también años de altos y bajos caudales.

#### **Etapas en el desarrollo de la modelación matemática en hidrología [6].**

**Etapas pionera de los años 70 y 80** de investigación. En este periodo los modelos se desarrollaron con fines fundamentalmente académicos o de apoyo a la investigación, formulados en su mayoría en lenguaje Fortran (y principalmente Fortran IV).

También organismos de manejo, control y operación de los recursos hídricos como la Autoridad del Río Mississippi y del Dto. de Recursos Hídricos de California y Nevada en USA o de los Ríos Po y Támesis en Europa, desarrollaron modelos de uso institucional. Estos modelos y sus códigos fuente modernizados con lenguajes más avanzados son hoy la base de muchos de los modelos actuales.

**Etapas de modelos de uso público** con miras a su utilización profesional en diseño hidrológico vendidos en su mayoría por las propias universidades u organismos que los desarrollan.

**Etapas actuales de gran divulgación** de modelos muy desarrollados y que se bajan gratuitamente por Internet como los múltiples modelos desarrollados por el Hydrologic Engineering Center de Davis, California (Estados Unidos).

Conviven en esta etapa modelos comerciales como el Mike 21 el Sobek y el HVB (Europeos) y los modelos que se bajan gratuitamente por Internet como los del "U.S. Army Corps of Engineers (HEC) de Estados Unidos".

En la década del 90 y lo que llevamos del siglo 21 nos encontramos con modelos hechos por bloques (building block models) que integran a sistemas de información geográfica con modelos meteorológicos y modelos hidrológicos [12].

#### **La Hidrología en Tiempo Real**

Los métodos de transmisión de datos a distancia (radiales, VHF o UHF, satelitales o de rebote en meteoritos) dan apoyo a la hidrología en tiempo real que mediante modelos matemáticos funcionando en línea con la recepción de datos permite el conocimiento de eventos (que suceden en lugares remotos) es una estación central con fines de pronósticos anticipados, por ejemplo de crecientes [5].

#### *El futuro es hoy*

La utilización directa de imágenes de radares digitalizados, de modelos digitales del terreno y de imágenes de satélite permite y permitirá cada vez más el uso de modelos distribuidos y bidimensionales donde la unidad territorial es el píxel en el interior de una cuenca en lugar del área geográfica de la subcuenca. La falta de datos detallados permite, por el momento, solo en ciertas regiones altamente desarrolladas, el uso generalizado de estos modelos.

#### *Los datos en la Modelación Hidrológica*

Los datos necesarios para la modelación hidrológica de cuencas son: hidrometeorológicos, hidrológicos, geomorfológicos, edafológicos, geológicos y cartográficos. Cada conjunto de datos debe ser examinado en relación a homogeneidad, longitud y exactitud del registro. La adquisición de datos no ha ido en concordancia con el desarrollo de los modelos [12].

#### *Se ha colocado el caballo detrás del carro*

Hoy es frecuente, salvo algunas excepciones tener que usar modelos más simples que se alejan más de la realidad física pero que necesitan menos datos para funcionar.

En la Argentina, este es un problema que lejos de mejorar ha tenido una involución. Como ejemplo típico de esto es el caso de los registros de lluvias. En la época de oro de la red ferroviaria con 47.000 km activos de líneas férreas se medían lluvias en cientos de estaciones del ferrocarril, siguiendo una práctica instalada por la administración inglesa como copia de lo que se hace en Inglaterra. Hoy acá en el resto que queda de red ferroviaria esto no se hace.

Hay por supuesto excepciones como son las cuencas de los ríos Neuquen y Limay. Los datos hidrométricos del verano en algunas cuencas aluvionales de Mendoza, Córdoba y San Luis y posiblemente algunos otros datos puntuales.

Donde la falencia es dramática es en la cobertura de radares meteorológicos, que se ten-

ga conocimiento sólo la ciudad de Buenos Aires y Mendoza tienen disponible este tipo de radares (que no son los radares de la seguridad aérea).

En Estados Unidos y en Europa Occidental hay redes de radares meteorológicos que abarcan gran parte de sus territorios. Tenemos disponible selección de imágenes de diversos satélites que se bajan por Internet en el sitio de la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) o del SMN (Servicio Meteorológico Nacional). Esto ha ayudado a mejorar sensiblemente los pronósticos meteorológicos.

#### *Características que deben cumplir los modelos de uso práctico*

**Generalizados:** es decir diseñados para ser aplicados a un amplio rango de problemas, es decir tratar con sistemas naturales de varias configuraciones y localidades y no ser direccionados a un problema específico.

**Manejables:** es decir tiene que estar bien documentadas, y testeado y ser de fácil comprensión para el profesional y no solo para aquel que lo desarrolló.

En el marco de estos conceptos se puede decir que buena parte de los cientos de modelos existentes en la literatura **no son ni generalizados ni manejables** y se desarrollan solo para un fin y un momento.

Los modelos con estas características, juegan un papel importante no solo en el diseño sino en la transferencia de conocimientos [4].

#### *Calibración y Validación*

Por bueno que sea un modelo sino se cuenta con buenos datos no es posible su uso con responsabilidad y si teniendo datos no se lo calibra y se lo verifica no darán resultados serios y coherentes [6].

#### **- Si entra basura sale basura**

La calibración es normalmente tarea pesada y que lleva tiempo. La optimización automática de parámetros puede ayudar pero debe ser tratada con precaución. La optimización matemática de parámetros pueden llevar a una aparente buena calibración, pero con valores de los parámetros fuera de los límites físicos aceptables.

Por eso dos destacados hidrólogos Loagne y Freeze sugieren que la calibración de modelos hidrológicos es más arte que ciencia.

#### *Conceptos finales*

Al modelar fenómenos naturales se deben considerar además de las herramientas matemáticas que interpretan el fenómeno físico, los

métodos probabilísticos de una cuota de azar ya que siempre existirán grados de incertidumbre como consecuencia de la no linealidad de las leyes que rigen los procesos naturales.

#### *Algunos casos reales*

1. Modelación por evento de los ríos Limay y Neuquen para el Manejo de los embalses de Alicurá, Piedra del Águila y El Chocón y verificar su seguridad hidrológica (ver Fig. 3). Se desarrollará solo el caso de la presa de Alicurá sobre el río Limay modelada con el modelo HEC-HMS (del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos) [7].

2. Aplicación del modelo hidráulico e hidrológico bidimensional Sobek (del laboratorio de Delft-Holanda) en la Cuenca del Río Adige en Italia para calcular los daños producidos por inundaciones [11], [4].

#### **Simulación hidrológica del Río Limay**

Convenio Organismo regulador de seguridad de presas (ORSEP)-Instituto Nacional del Agua (INA). "Estudio de la Crecida Máxima probable para simular el comportamiento de las presas de Alicurá, Piedra del Águila y El Chocón y verificar su seguridad hidrológica".

Datos: AIC (Autoridad de las Cuenca de los ríos Limay Neuquen y Negro) y de ORSEP (Organismo Regulador de Seguridad de Presas)

#### **Sistema del Río Negro [3]**

##### **Río Neuquén en Paso de Los Indios**

Area: 30.843 km<sup>2</sup>

Módulo del río: 311 m<sup>3</sup>/s

Río Limay en Paso Limay

Area: 26.400 km<sup>2</sup>

Módulo del río: 736 m<sup>3</sup>/s

##### **Río Negro en Paso Córdoba (Roca)**

Area: 89.000 km<sup>2</sup>

Módulo del río: 988 m<sup>3</sup>

#### *Áreas cubiertas de nieve*

Para la determinación de las áreas cubiertas de nieve en los periodos considerados se utilizaron las imágenes del satélite NOAA de USA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y como sistema de información geográfica el modelo IDRISI.

Para medir correctamente esas áreas se utilizó una herramienta específica del satélite NOAA que es un radiómetro de alta resolución: "Advanced very high resolution radiometer". La nieve tiene elevada reflectividad en el espectro visible y la imagen que se obtiene se exportó a un CAD que permitió diferenciar los campos de nie-

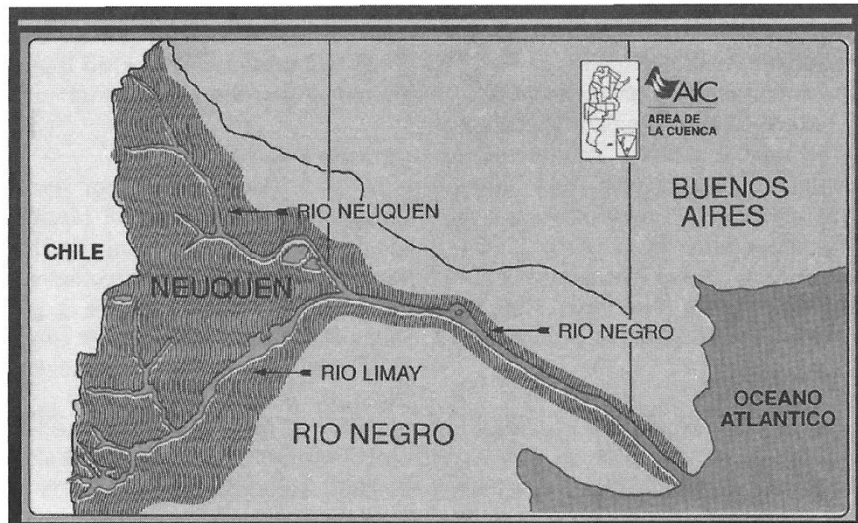


Fig. 3. Cuencas de los ríos Limay-Neuquén y Negro

ve en cada subcuenca y calcular las áreas y el porcentual correspondiente.

*Cubrimiento vegetal*

La determinación de la cobertura vegetal (tipo de vegetación y % de cobertura) tiene mucha importancia en la simulación del proceso de lluvia-escorrentía. Para ello se usó el índice NDVI.

Rango de NDVI (por su sigla en inglés) de Índice Normalizado Diferencial de vegetación obtenida de información satelital del satélite NOAA-14.

Tipo de Vegetación	Rango de NDVI
Sin vegetación	0-100
Desierto de altura	101-105
Estepa herbácea	106-110
Praderas	111-115
Parque	116-120
Bosque semidenso	121-125
Bosque denso	> 125

**Resultados**

El resultado final del comportamiento de la Presa de Alicurá para la creciente de Junio y Julio de 1993 de sintetizan en la Fig. 4 y en la Tabla I.

Con la simulación de la creciente histórica de junio-julio de 1993 el embalse llega a un nivel normal de cota 699 msnm y un volumen de 2855 Hm<sup>3</sup> con una descarga controlada de 444 m<sup>3</sup>/s, su comportamiento es adecuado.

Con el modelo calibrado se probaron situaciones de crecientes máximas probables comprobándose el comportamiento adecuado de la presa. En la Tabla 1 se marca la condición simulada y los valores límites de las franjas de operación de la presa.

**Evaluación de daños causados por inundaciones en la cuenca del Río Adige (Italia)**

*Cuenca del Río Adige*

La cuenca imbrífera del Río Adige con cierre en Bronzolo consta de dos ramas tributarias principales dispuestas de manera simétrica con respecto a la sección terminal.

Al oeste el Río Adige y al este el torrente Rienza-Isarco. La extensión de la cuenca en Bronzolo es de 6.926 km<sup>2</sup>. Por la extensión total de su cuenta (12.100 km<sup>2</sup> en su desembocadura en el Adriático. Es el tercer río de Italia luego del Po (70.000 km<sup>2</sup>) y del Tiber (17.000 km<sup>2</sup>). Nace en los Alpes y luego de recorrer 410 km desemboca en el Adriático, (en la laguna de Venecia), bañando a su paso ciudades como Trento, Verona, Legnago, Badia y varios centros menores.

**Relevamiento altimétrico**

*Tecnología Láser Aérea de sensores remotos*

Las propiedades de la superficie del terreno (mapa base planialtimétrico) y de la vegetación son clave para la modelación matemática de cuencas. Los sistemas terrestres tradicionales

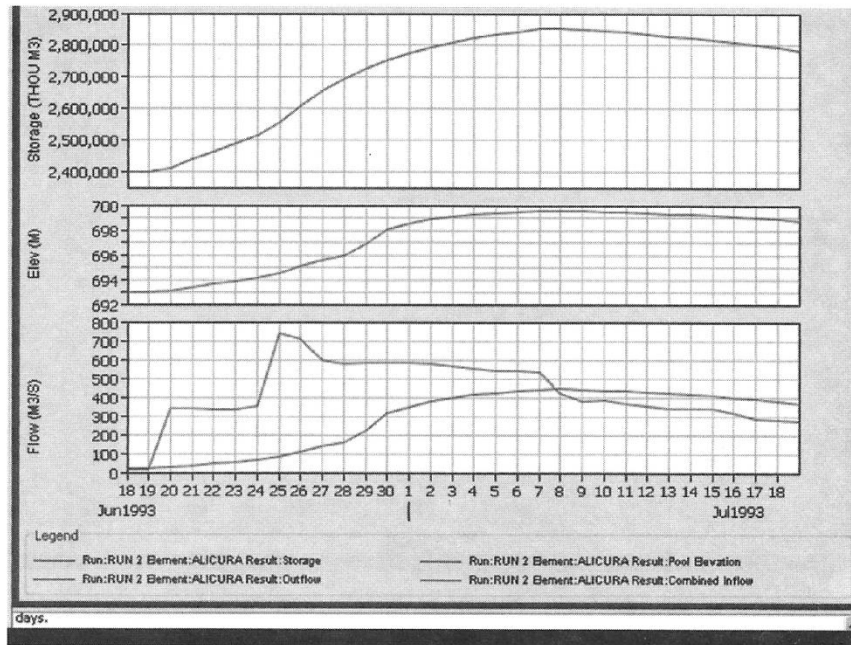


Fig. 4. Gráficos finales del comportamiento de Alicurá

Tabla I – Tabla de Alicurá

	Cota snm	Volumen Hm <sup>3</sup>	Descarga (m <sup>3</sup> /s)		
			1 comp.	2 comp.	3 comp.
	687	2.169	0.0	0.0	0.0
	692.20	2.350	0.0	0.0	0.0
Franja de operaciónn normal	693.00	2.400	20.7	41.40	62.10
	695.00	2.600	106.1	212.20	318.10
	697.00	2.730	231.5	463.00	694.50
	<b>700.00</b>	<b>2.890</b>	<b>480.4</b>	<b>960.80</b>	<b>1441.20</b>
Max normal	702.00	3.000	683.1	1366.20	2049.30
	705.00	3.215	892.10	1784.20	2676.30
Franja emergencia Max extraord.	707.00	3.250	1000.00	2000.00	3000.00
	709.00	3.350	1150.00	2300.00	3450.00
	709.28	3.493	1170.00	2340.00	3510.00

son difíciles y consumen mucho tiempo. Los sistemas de altímetro láser aéreo de perfilado y escaneo proveen un método alternativo para medir la topografía del terreno y las características de la vegetación (altura y cobertura) en grandes áreas de terreno e incluso de difícil acceso. Esto hoy también se puede lograr con imágenes de satélites de alta resolución y altimetría con satélites equipados con radares que producen planos globales.

### Análisis Hidrológico

*Solución de la confluencia Adige y el Isarco*

Reconstruir la onda de creciente teniendo en cuenta la posibilidad de una distribución no

uniforme de la lluvia en el Adige y en el Rienza. Para resolver el problema se ha utilizado un modelo de generación de caudales en ambas ramas utilizando una generación con método de Monte Carlo generando numerosas ondas sintéticas de caudales de crecientes caracterizadas por su probabilidad de ocurrencia [4].

### Análisis Hidráulico

*Modelo Bidimensional "Sobek"*

El modelo bidimensional "SOBEK" es un modelo comercial del Laboratorio de Hidráulica de Delft (Holanda) que integra módulos de simulación hidrológica e hidráulica. Los módulos hi-

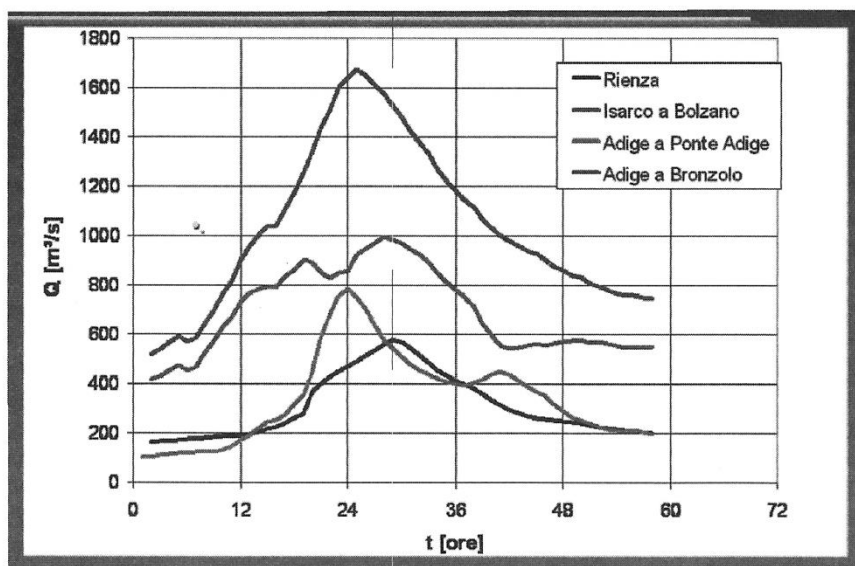


Fig. 5. Hidrogramas de Proyecto. Tiempo de Retorno 100 años

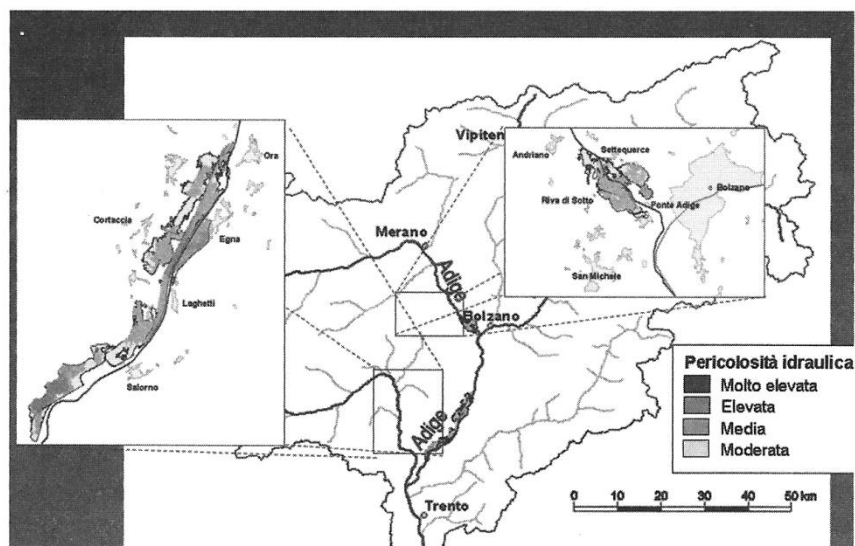


Fig. 6. Áreas con riesgo de inundación en Ponte Adige y en Egna.

dráulicos son monodimensionales (para canales) y bidimensionales (para planicies de inundación) [8], [11].

Los módulos disponibles son los siguientes:

- Precipitación - escorrentía (rainfall-runoff)
- Flujo en canales unidimensional (channel flow) Saint Venant 1D

- Flujo en alcantarillas (sewer flow)
- Control en tiempo real (real time control)
- Calidad de agua (water quality)
- Carga de desechos (waste loads) carga de contaminantes
- Flujo superficial bidimensional (overland flow) 2D
- Flujo subterráneo (groundwater)
- Flujo en ríos



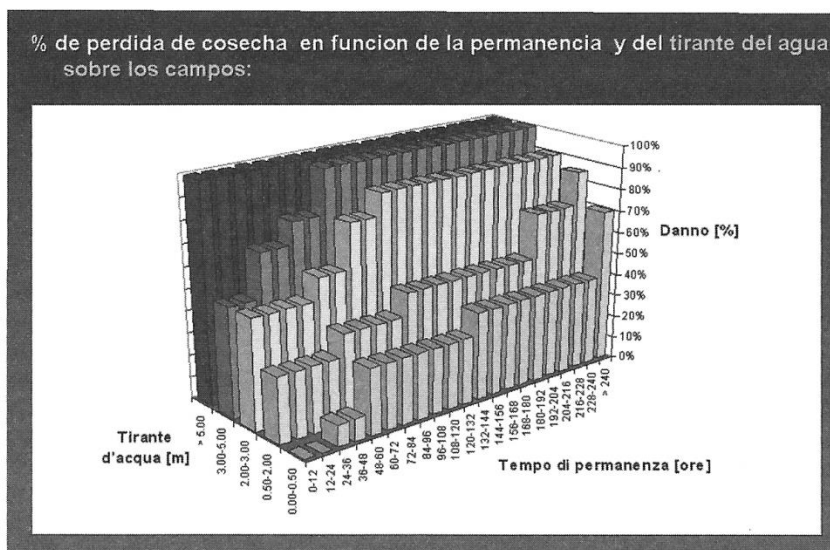


Fig. 7. Vulnerabilidad (% de Daño)

Tabla II. Calibración del Modelo de Cálculo del Daño

Tipo de daño	Valor del daño relevados	(Euros × 10 <sup>6</sup> simulados)
Daños totales en frutales	12.73	10.91
Indemnización por pérdida de plantas	6.62	4.42
Indemnización por pérdida de cosechas	6.11	6.50
Daños en equipos agrícolas	6.62	6.80

Los datos meteorológicos que caracterizan el comportamiento de los sistemas de agua son:

**Precipitación:** es un evento de lluvias intensas o de periodos largos continuos con o sin lluvias. El evento de precipitación utilizado como tormenta de diseño, depende de la relevancia del problema en cuestión.

**Evaporación:** es la pérdida de agua hacia la atmósfera desde cuerpos agua o el suelo. Durante periodos secos la evaporación juega un papel importante en el balance del agua.

**Viento:** es el movimiento del aire atmosférico. En sistemas de canales largos y estrechos y/o grandes superficies de cuerpos de agua, los vientos fuertes pueden causar incrementos locales en el nivel de agua.

*Determinación de áreas inundables*

El modelo hidrológico determina para diferentes tormentas (históricas y simuladas) las

crecientes de proyecto para diferentes frecuencias (o tiempos de retorno).

Estos hidrogramas son el input del modelo hidráulico bidimensional, que determina las áreas con riesgo de inundación, Figs. 5 y 6.

**Estimación del daño**

**Modelo Conceptual**  
 Daño = f  
 Variables hidráulicas  
 Variables ecológicas  
 Variables urbanísticas  
 Variables económicas

**Modelo Conceptual**  
 Tipología del daño considerado  
 - Agricultura  
 - Pérdida de cosecha  
 - Daños en las plantaciones  
 - Daños en la infraestructura agrícola

Cuantificación en valor monetario

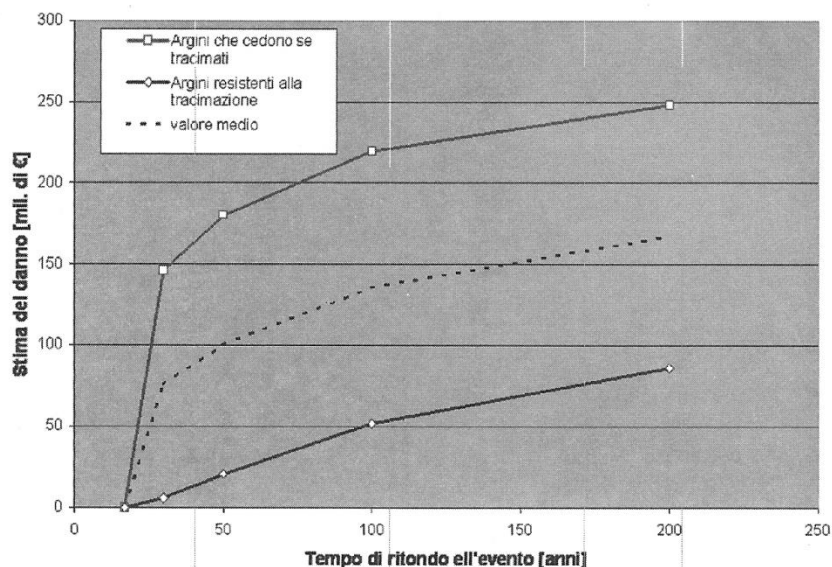


Fig. 8. Estimación del daño en ausencia y en presencia de intervenciones para corrección

- Sector secundario y terciario
- Infraestructura
- Interrupción de la actividad
- Daño a zonas urbanas
- Daño a la infraestructura civil (interrupción de servicios, daños sanitarios)
- Daños ecológicos (contaminación, destrucción del ecosistema)
- Costo de las intervenciones necesarias

*Se presentará solo la tipología agrícola*

Los parámetros usados fueron: **profundidad del agua, tiempo de permanencia y velocidad de la corriente**- que son los resultados del modelo hidráulico bidimensional.

Estos parámetros se superponen a los mapas de uso de la tierra y parámetros económicos de los bienes sometidos al riesgo y mediante el uso de funciones de daño o curvas de vulnerabilidad en cada celda del dominio de cálculo se derivan los mapas de daños y el valor total del daño económico asociado al evento de inundación simulado como se presenta en el gráfico de la Fig. 7 que indican el % de pérdidas en función de la permanencia y el tirante del agua sobre el terreno

Analizando la Fig. 7 se ha representado el porcentaje de daño (ordenada) en función de dos de las tres variables consideradas (abscisas) el tiempo de permanencia (en horas) de

la inundación sobre el terreno y la altura del tirante del agua expresada en metros.

Así, si el tirante no sobrepasa 0.5 metros el tiempo de permanencia no produce pérdidas hasta 24 horas, produce pérdidas del 20% hasta 132 horas y un máximo de 70% cuando supera las 240 horas.

Tomando los valores del tirante de agua se ve que para un tiempo de permanencia de 48 horas, si el tirante no pasa de 0,50 m. el daño es menor del 10%, aumenta al 40% para tirantes de 2.00 metros y llega al 100% para tirantes mayores de 5.00 metros.

Para tirantes entre 3 y 4 metros si el tiempo de permanencia es de 24 horas, el daño es del 50% y llega al 100% si el tiempo de permanencia supera las 36 horas. En igual forma en el gráfico se pueden leer las diferentes alternativas.

#### *Calibración del modelo de cálculo del daño*

Al fin de calibrar y evaluar el comportamiento del modelo se tomó como testigo los daños reales, relevados para la inundación de julio de 1981 que afecta las comunas de Egna y Salomo y se comparó con los daños simulados con el modelo, como se indica en la Tabla II.

La Fig. 8 muestra para la creciente de un tiempo de retorno de 100 años con una defensa lateral, el daño es de 50 millones de Euros y llega a 220 millones sin la defensa.

### Referencias

- [1] Biswas, A. *History of Hydrology*. North-Holland. Publishing. 2<sup>nd</sup> Edit. Amsterdam-London. 1972.
- [2] Dal Mazo, L. *Roma de los Cesares* Bonechi - Edizione, 2<sup>a</sup> Edic. Florencia 1979.
- [3] Evarsa - Subsecretaría de Recursos Hídricos *Estadística Hidrológica de la República Argentina* Edición digital confeccionada por Evarsa. Buenos Aires 2004.
- [4] Fattorelli, S. y Fernández, P. *Diseño Hidrológico*, Zeta Editores, 1<sup>a</sup> Edic., Mendoza, 2007.
- [5] Fernández, P; Fornero, L. y Rodríguez, S. *Sistemas Hidrometeorológicos en Tiempo Real Lluvias y Tormentas de Mendoza* Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria n<sup>a</sup> 27 1<sup>o</sup> Edic. Buenos Aires, 1999.
- [6] Gupta, V. y Sorooshian, S: *Calibration of Conceptual Hydrologic Models: Past Present and Future*. The University of Arizona, Texas, pp. 329-346.
- [7] HMS 3.1.0. *Hydrologic Modeling System*. U.S. Army Corps of Engineers HEC Center, Davis, California, Estados Unidos.
- [8] HEC-RAS 4.00 Beta Version *River Analysis System* U.S. Army Corps of Engineers. HEC Center, Davis, California, Estados Unidos.
- [9] Levi E. *The Science of Water. The Foundation of Modern Hydraulics*. ASCE Press First Edit, en ingles New York. 1995.
- [10] Rouse H. and Ince S. "*History of Hydraulics*". Dover Publications Inc. 2<sup>nd</sup> Edit. New York. 1963.
- [11] Modelo Bidimensional *Sobek*. Laboratorio de Hidráulica de Delft. Delft, Netherlands.
- [12] Wurbs, R. *Water Management Models - A Guide to Software* Prentice Hall PTR 1<sup>st</sup> Edit, New Jersey, 2004.

Manuscrito recibido el 24 de abril de 2008

Aceptado el 10 de junio de 2008