

PREDICCIÓN DE CRECIENTES EN EMBALSES DE CÓRDOBA

Carlos Gastón Catalini ⁽¹⁾ - Gabriel E. Caamaño Nelli ⁽²⁾

(1) y (2) Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua, República Argentina

(1) Agencia Córdoba Ciencia S.E

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Universidad Nacional de Córdoba

Medrano 235, (5152) V. Carlos Paz, Córdoba

Tel (03541) 422347 E-mail: cgcatalini@argentina.com

RESUMEN

El tema de lluvias para diseño está comprendido en el ámbito de la predicción al igual que la evaluación de crecidas en lagos y embalses, las cuales son capaces de causar daños en riberas urbanas. De esta asociación surge la idea de adaptar la técnica de estimación convencional de lluvias de diseño, basada en relacionar intensidad-duración y recurrencia (función i-d-T), a la predicción de crecientes lacustres mediante un cambio de variables (función Q-d-T).

Para el presente artículo se emplearon dos sistemas de ensayo, ellos son, el embalse San Roque y Los Molinos, ambos se sitúan en el centro geográfico del territorio sudamericano de la Republica Argentina. La selección de los mismos se baso en la disponibilidad de los datos, y la existencia cierta de una amenaza.

Los resultados alcanzados demuestran que las hipótesis de partida se cumplen plenamente y que es válido transformar el planteo i-d-T, habitual en la caracterización de lluvias de diseño, para predecir volúmenes de agua ingresados a lagos y embalses a través de una función Q-d-T, sin alterar la naturaleza del enfoque.

Los estimadores de dicha relación ensayados en el presente estudio, es decir, una familia de FDP lognormales por duración y el modelo DIT, se adecuan perfectamente a esa transformación y constituyen herramientas idóneas para representar el proceso físico.

Con la adaptación del DIT para representar la función Q-d-T y el software desarrollado para predecir escenarios críticos, se ha logrado cuantificar la amenaza de inundación en los embalses San Roque y Los Molinos. Gracias a estos potentes algoritmos se logro confeccionar los mapas de riesgo hídrico de los perilagos de los embalses San Roque y Los Molinos, en los cuales se asocian *eventos hidrológicos críticos*, de recurrencias dadas, con *información cartográfica*, delimitando así zonas con distintos niveles de amenaza.

Los mismos constituyen herramientas útiles para todos aquellos entes provinciales, locales, de defensa civil, turismo, planeamiento, hidráulica y a emprendimientos particulares en las riberas.

Palabras clave: Predicción, Crecientes, Modelos matemáticos, Mapa de riesgo.

INTRODUCCIÓN

Un desastre puede definirse como un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando alteraciones intensas sobre los elementos sometidos, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y/o daños severos sobre el medio ambiente. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida, genera adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país y/o la modificación del medio ambiente; lo anterior determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata.

Algunos desastres de origen natural corresponden a *amenazas* que no pueden ser neutralizadas, debido a que difícilmente su mecanismo de origen puede ser intervenido, aunque en algunos casos puede controlarse parcialmente. Terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis y huracanes son ejemplos de amenazas que aun no pueden ser intervenidas en la práctica, mientras que inundaciones y deslizamientos pueden llegar a controlarse o atenuarse con obras civiles.

El anegamiento de los perilagos de los embalses que proveen de agua a la ciudad de Córdoba (San Roque y Los Molinos), representan un riesgo de esta última categoría, a punto tal que obligó a rehabilitar las válvulas de fondo del San Roque, (en desuso desde hace años), luego de una importante crecida que afectó a la ciudad serrana de Villa Carlos Paz. Aunque, los altos niveles de los embalses no entrañan peligro para vidas humanas causan, en cambio, cuantiosos daños económicos, que se producen precisamente en la época de mayor actividad turística.

El riesgo que entraña este tipo de fenómenos naturales puede reducirse si se lo interpreta como el resultado de relacionar su amenaza (*probabilidad de ocurrencia*) con la *vulnerabilidad* de los elementos expuestos (factor interno de severidad de los efectos) ya que así es posible identificar las medidas de mitigación más adecuadas, *estructurales* (obras de protección e intervención sobre la vulnerabilidad de elementos bajo riesgo) y *no estructurales* (regulación de uso del suelo, incorporación de costos preventivos en presupuestos de inversión, entrenamiento para la emergencias, etcétera).

Sobre este último ítem, Caamaño et al. (2002) y Catalini (2003 y 2004), desarrollaron metodologías y herramientas que permitieron su determinación y cuantificación.

Concretamente, con este artículo, se intenta mostrar los resultados obtenidos y de esta forma dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- Mostrar la validez de técnicas predictivas de lluvias para reflejar el comportamiento de lagos y embalses, estableciendo los efectos del estado inicial y del manejo de los sistemas al momento de realizar la estimación.
- Determinar, mediante la aplicación de las técnicas antedichas, la amenaza y riesgo de inundación de los perilagos habitado (normal o temporalmente) o en vías de estarlo, de los embalses San Roque y Los Molinos.
- Ofrecer una herramienta útil para los entes e instituciones encargadas de planificar, gestionar y determinar el uso del territorio.

SISTEMAS DE ESTUDIO

Habida cuenta de las premisas planteadas, y con la intención de generalizar las técnicas de predicción de lluvias para reflejar el comportamiento de lagos y embalses, se seleccionaron dos sistemas de estudio.

Estos son, los embalses San Roque y Los Molinos, los cuales se sitúan en el sector central del territorio Argentino, más precisamente en la provincia de Córdoba, hacía el W de la ciudad de Córdoba (Figura 1).

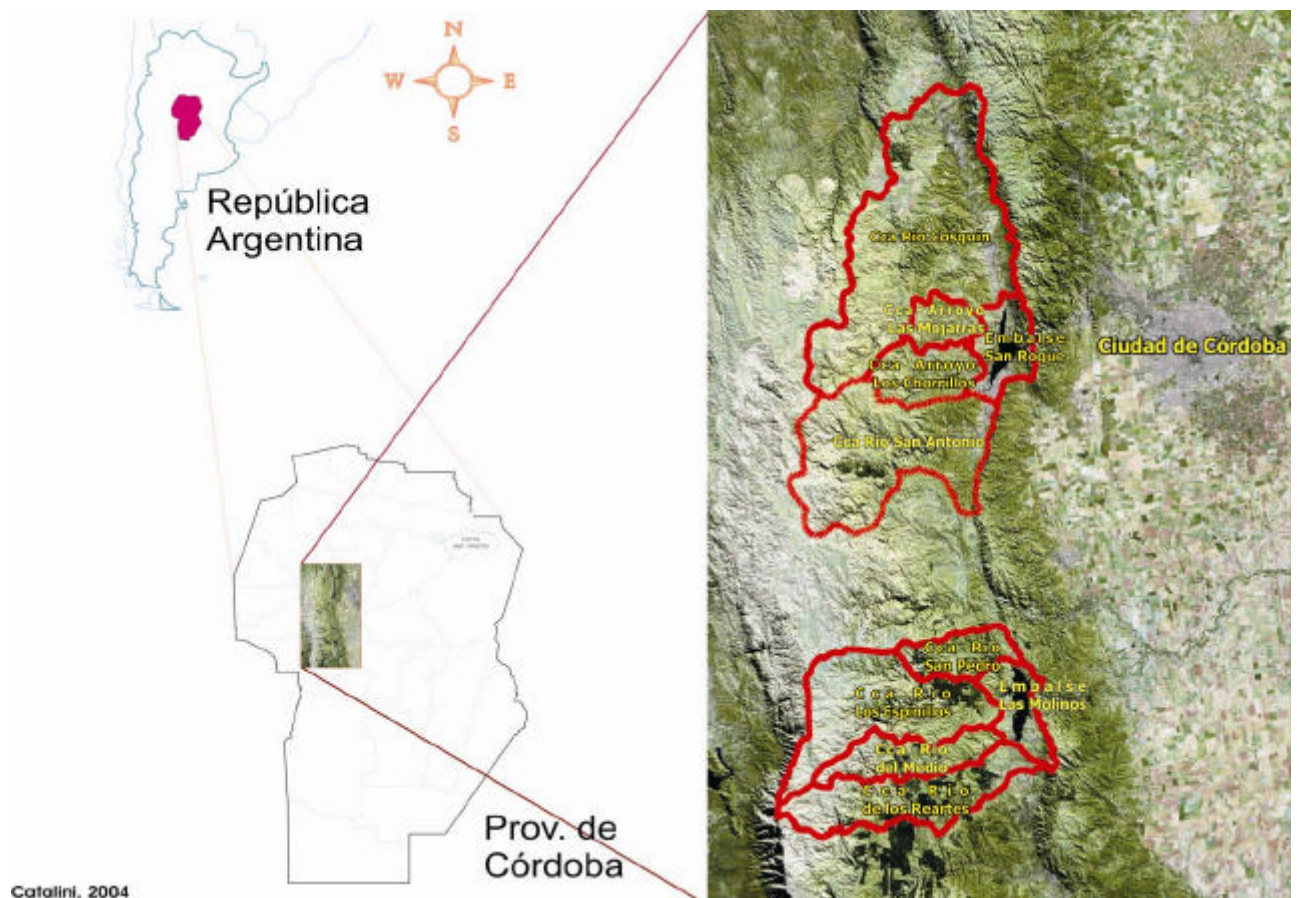


Figura 1: Embalses San Roque y Los Molinos. Ubicación geográfica y unidades hidrológicas.

El primero de los sistemas seleccionados es el formado por el embalse San Roque, el cual colecta las aguas de los ríos Cosquín y San Antonio, además de los arroyos Las Mojarra, Los Chorrillos y los aportes no encauzados del perillago. Estos afluentes constituyen la cuenca superior del Río Suquía, que actualmente nace del embalse, a pocos kilómetros de su recorrido hacia el este atraviesa la ciudad de Córdoba, capital provincial, y muere en la gran laguna salada de Mar Chiquita, depósito final de un extenso sistema endorreico.

La otra cuenca de estudio es la del embalse Los Molinos, en donde sus principales tributarios (de Norte a Sur) son los ríos; San Pedro, Los Espinillos, Del Medio y Los Reartes junto con los aportes no encauzados del perillago.

Estos tributarios constituyen la cuenca del río Los Molinos, que actualmente nace en este embalse. Que luego de pocos kilómetros de recorrido confluye con el río Anisacate, para formar el río Xanaes que al igual que el río Suquía deposita sus aguas en la laguna de Mar Chiquita.

Estos embalses cubre la mayor parte de los requerimientos de agua para el consumo humano de la ciudad de Córdoba (1.400.000 habitantes), a su vez de proveer agua para riego, atenuación de crecidas y generación hidroeléctrica.

METODOLOGÍA

Estimación de la Pérdida de Capacidad de Almacenamiento

En los lagos artificiales uno de los principales inconvenientes que se presentan con el transcurso del tiempo, es la pérdida de capacidad de almacenamiento. Este fenómeno es causado por la introducción en el cuerpo de agua de los sedimentos producidos en la cuenca, los cuales pueden disminuir o acortar en forma significativa la vida útil de la obra.

Ante esta situación y con la finalidad de disminuir las incertidumbres existentes, se realizó una determinación expeditiva de la capacidad actual.

Para ello se empleó, toda la información batimétrica existente, la cual no se encuentra actualizada razón por la cual, los valores obtenidos de colmatación son solo indicadores de estado, que representan el orden de magnitud de esta variable. En las tablas 1 y 2 se pueden apreciar los resultados alcanzados para el embalse San Roque y Los Molinos.

Tabla 1: Pérdida de capacidad de almacenamiento emb. San

h (m)	Embalse Total V ₁₉₂₉	Embalse Total V ₁₉₈₇	Embalse Total V ₂₀₀₃	Vol. Sed. Total 2003	Vol. Sed. Parcial		
10.0	0.173	0.040	0.039	0.135	0.135		
12.5	0.567	0.243	0.237	0.329	0.195		
15.0	2.458	1.954	1.908	0.549	0.220		
17.5	10.450	8.719	8.514	1.937	1.387		
20.0	24.763	21.066	20.569	4.194	2.257		
22.5	44.165	37.892	36.998	7.166	2.972		
25.0	67.607	59.040	57.647	9.959	2.793		
30.0	124.349	113.173	110.503	13.846	3.887		
35.3	201.100	189.372	184.905	16.196	2.350		
				Total	16.196 Hm ³		
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="padding: 5px;">8.05%</td> <td style="padding: 5px;">Pérdida de la capacidad de almacenamiento en 58 años</td> </tr> </table>						8.05%	Pérdida de la capacidad de almacenamiento en 58 años
8.05%	Pérdida de la capacidad de almacenamiento en 58 años						
<i>Vol. de Sedimento Ingresado al Embalse 1945-2003 =</i>				16.196 Hm³			
<i>Pérdida media Anual de capacidad del Embalse =</i>				0.279 Hm³/año			

Tabla 2: Pérdida de capacidad de almacenamiento emb. Los

h (m)	Embalse Total V ₁₉₅₃	Embalse Total V ₁₉₇₂	Embalse Total V ₂₀₀₃	Vol. Sed. Total 2003	Vol. Sed. Parcial
24.0	7.000	6.990	6.696	0.304	0.304
36.0	52.060	51.818	49.642	2.418	2.114
40.0	98.460	96.157	92.120	6.340	3.922
45.0	163.000	158.121	151.482	11.518	5.178
50.0	247.000	239.546	229.488	17.512	5.995
55.0	356.720	346.690	332.133	24.587	7.075
57.0	400.000	389.965	373.591	26.409	1.822
				Total	26.409 Hm³

6.60% Pérdida de la capacidad de almacenamiento en 50 años

Vol. de Sedimento Ingresado al Embalse 1953-2003 = 26.409 Hm³
Pérdida media Anual de capacidad del Embalse = 0.528 Hm³/año

Calibración de ecuaciones Cota-Área y Cota-Volumen

En ambos embalses, la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento de la Provincia de Córdoba (DIPAS), emplea para determinar la superficie del espejo de agua y el volumen almacenado las relaciones *Cota-Área (h-A)* y *Cota-Volumen (h-V)* originales, dejando de lado la pérdida de capacidad de almacenamiento originada por la colmatación propia de estas obras.

Por ello se procedió a establecer funciones analíticas, *h-A* y *h-V*, teniendo en cuenta los distintos estados de colmatación reconocibles, lo que permitió calibrar las funciones analíticas de h-A y h-V, las cuales respondieron a expresiones del siguiente tipo;

$$\frac{1}{A^p} = f \cdot h - f \cdot h_0 \quad (1)$$

$$A = f \cdot [h - h_0]^p$$

$$a = f; \quad b = -a \cdot h_0; \quad h_0 = -\frac{b}{a}$$

$$V^{\frac{1}{p+1}} = \left(\frac{f}{p+1}\right)^{\frac{1}{p+1}} \cdot h - \left(\frac{f}{p+1}\right)^{\frac{1}{p+1}} \cdot h_0 \quad (2)$$

$$V = \left[\left(\frac{f}{p+1}\right)^{\frac{1}{p+1}} \cdot h - \left(\frac{f}{p+1}\right)^{\frac{1}{p+1}} \cdot h_0 \right]^{p+1}$$

En donde:

A= es la Superficie en km²

V= Volumen en Hm³

h₀= La cota inicial (por debajo de ella las expresiones carecen de validez)

h = La cota del embalse

p= Parámetro de calibración.

Determinación de variaciones de volumen a sistema cerrado

El paso siguiente, empleando las series de niveles diarios de ambos embalses, fue la de plasmar toda la información pertinente al manejo de los embalses en una única planilla (Descarga por válvulas, por vertedero, usos múltiples).

La cual en base a la cota diaria del espejo de agua sobre el cual se este trabajando, permite determinar la altura sobre el nivel de vertedero, el área ocupada por el embalse, el volumen de agua embalsado, la variación de volumen embalsado a sistema abierto (**DV**), los gastos totales (que es la suma de todas las descargas de agua por parte del embalse), el aporte bruto de agua ingresada al embalse y la variación del volumen de agua almacenado a sistema cerrado (incorporándose los gastos totales al valor de **DV**_{conocido}).

Cabe aclarar que la serie de niveles del embalse San Roque comienza el 1 de marzo de 1945, y se prolonga hasta la actualidad, mientras que la de Los Molinos solo se pudo contar con la serie desde el 1 enero de 1981 hasta la actualidad.

Adaptación de Técnicas de estimación de Lluvias de Diseño a lagos y embalses

El enfoque de la función i-d-T para lluvia de diseño, y por tanto los métodos para establecerla, se pueden transferir al caso de crecidas lacustres. Solo basta con redefinir la variable dependiente y usar otras unidades de trabajo, de modo, que la ecuación se plantea para valores totales de caudal, **Q**, volumen, **V**, y área, **A**.

Con esta analogía, reemplazando *i* por **Q**, sin alterar los conceptos de duración y recurrencia, los estimadores de máximos anuales (FDP lognormal y DIT) proveerían funciones Q-d-T para crecientes de diseño en lagunas y embalse.

En la adaptación de variables y para el trazado de las curvas Q-d-T, se empleó el Modelo DIT, el cual fuera desarrollado por Caamaño y García (1999) y adaptado por Caamaño, Catalini (2002). El mismo asume una distribución probabilística lognormal de las láminas máximas anuales (y se calibra sobre ternas Q-d-T extraídas de la FDP lognormales de las duraciones elegidas), preservando la base conceptual y, por ende, el sentido físico de los parámetros de este modelo, el DIT adaptado se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\ln (Q_{d,T}) = A \cdot \Phi_y - B \cdot d_y + C \quad (3)$$

Donde **F_y** es el *factor de frecuencia normal* y **d_y** el *factor de persistencia*, que dependen a su vez de las variables independientes, recurrencia y duración de la lluvia. El estimador algebraico del primero es (Caamaño y García, (1997)):

$$\Phi_y = 2,584458 \cdot (\ln T)^{0.375} - 2,252573 \quad (4)$$

en tanto que

$$d_y = (\ln d)^q \quad (5)$$

El DIT tiene 4 parámetros: el exponente q de la ecuación (5), B , C y A . Los dos últimos son sumas, entre cuyos términos se cuentan, respectivamente, m y s , la media y el desvío estándar de los logaritmos de la serie de láminas diarias máximas anuales.

Para esta adaptación, se seleccionaron 10 duraciones de crecida máxima anual: 1, 2, 3, 4, 7, 14, 28, 91, 183 y 365 días. A cada serie resultante se le asignó una función de frecuencia empírica Weibull y se ajustaron a ellas sendas distribuciones lognormales. Con las estimaciones de dichas FDP, en 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30, 40, 50, 80, 100, 120, 150, 180 y 200 años, se dibujaron las curvas Q - $\ln d$ para todos estos períodos de retorno, algunas de las cuales se exhiben en la figura 2, para el caso del embalse San Roque y figura 3, para el embalse Los Molinos (seccionadas en dos tramos, por conveniencia visual). Los coeficientes de determinación de este modelo fueron $R^2 = 0,99508$ en el San Roque y $R^2 = 0,99639$ en Los Molinos.

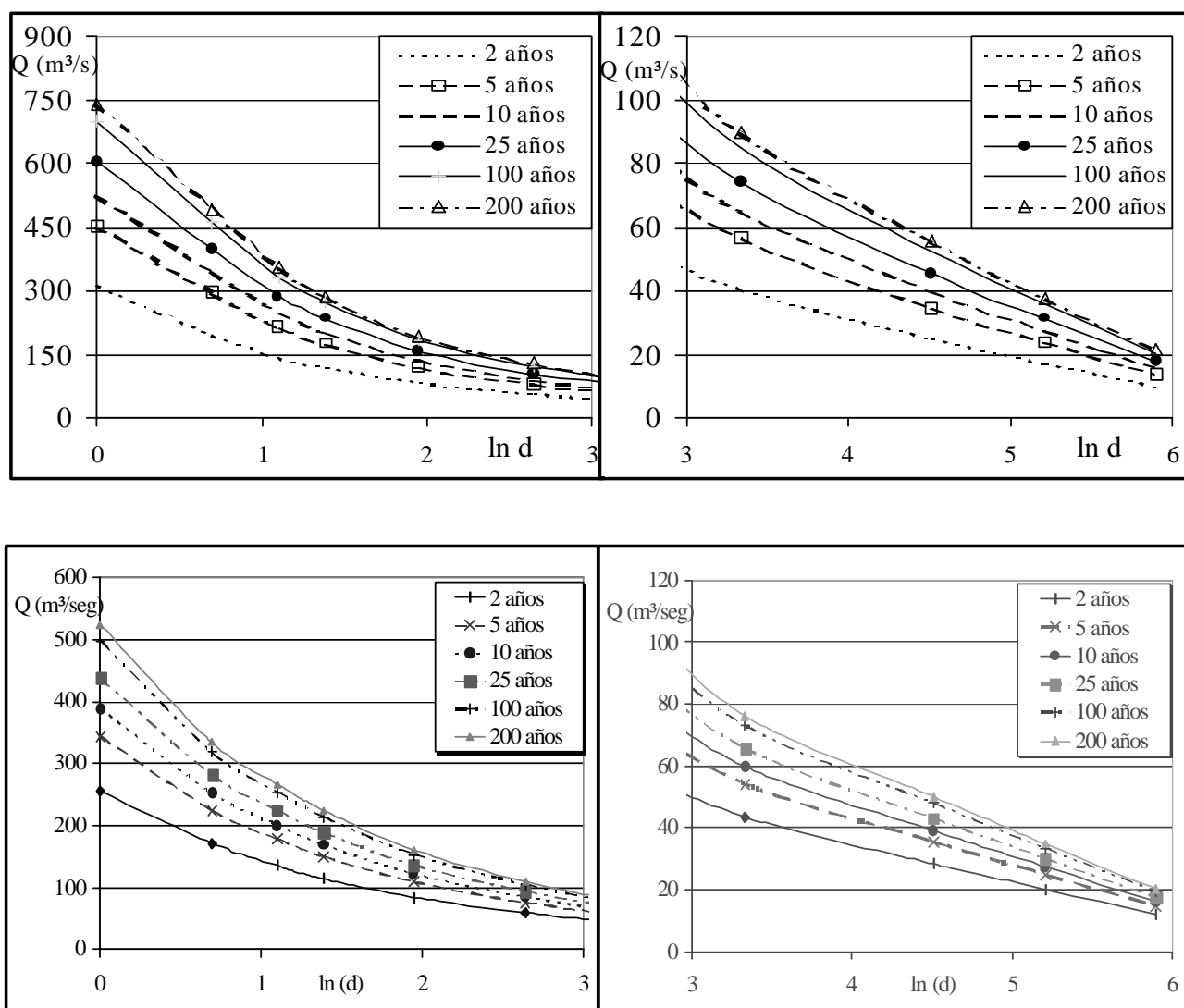
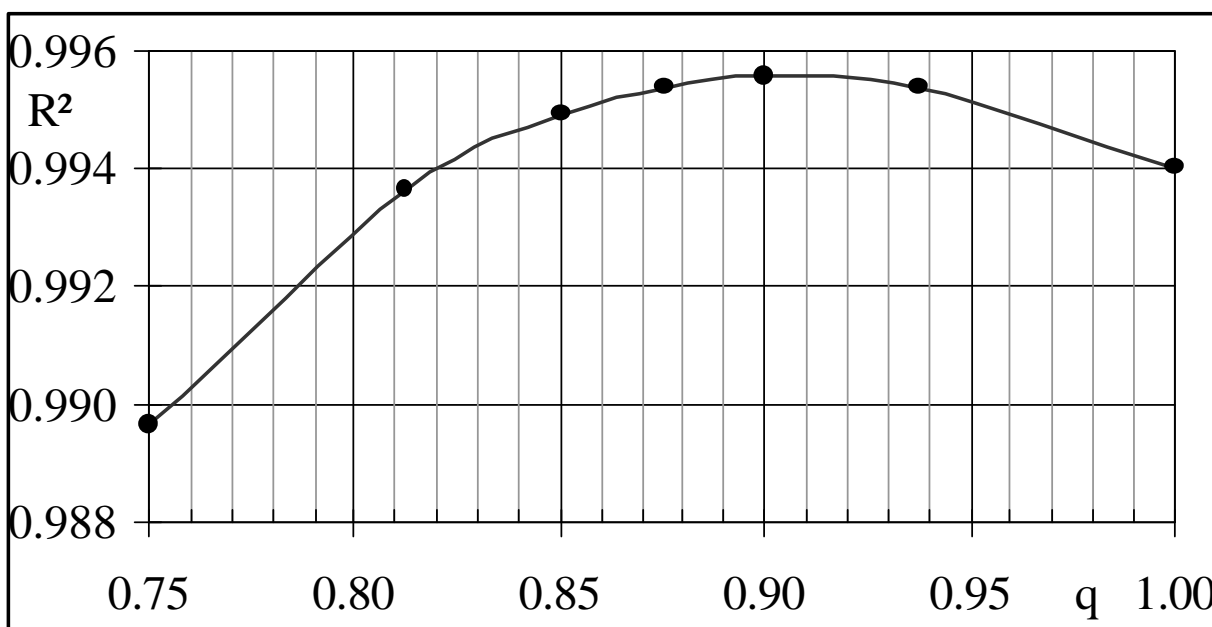
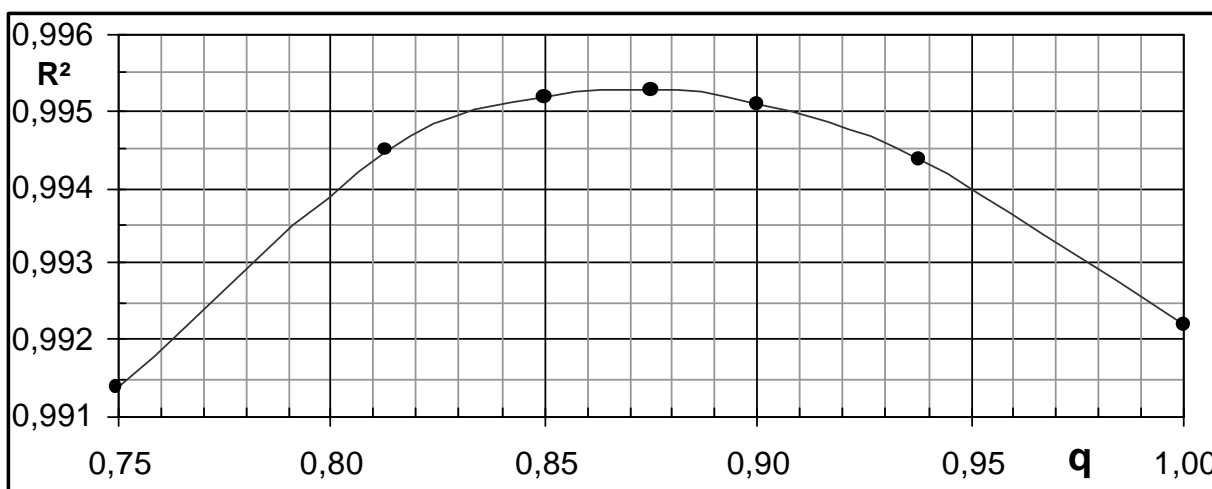


Figura 2: Relación Q - d - T estimada con funciones de densidad lognormales, embalse Los Molinos.

Con los mismos 200 nodos de cada una de las grillas (20 recurrencias, tomadas de la distribución lognormal de cada una de las 10 duraciones, para cada embalse) el Modelo DIT se calibró por regresión lineal sobre la expresión (1), en función del *factor de frecuencia normal*, F_y , y del *factor de persistencia*, d_y . Pero, como este último se desconoce a priori, fue necesaria una secuencia de pruebas, fijando cada vez el exponente de la ecuación (3) hasta hallar su valor óptimo.

En la figura 4, se presentan los resultados de los ensayos realizados para el embalse San Roque, en ellos se muestran que ese punto óptimo es $q = 0,875$.

Mientras que en la figura 5, se ofrecen los resultados de la optimización del valor del parámetro q , para el embalse Los Molinos ($q = 0,900$).



Para estos valores de q , la regresión sobre la ecuación 3, conduce a un coeficiente de determinación $R^2 = 0,99529$, para el embalse San Roque y los restantes parámetros del modelo adquieren los siguientes valores:

$$A = 0,3019; \quad B = 0,7246 \quad \text{y} \quad C = 5,8786.$$

Las trazas de la función Q-d-T del modelo DIT para el embalse San Roque, se pueden apreciar en la figura 6.

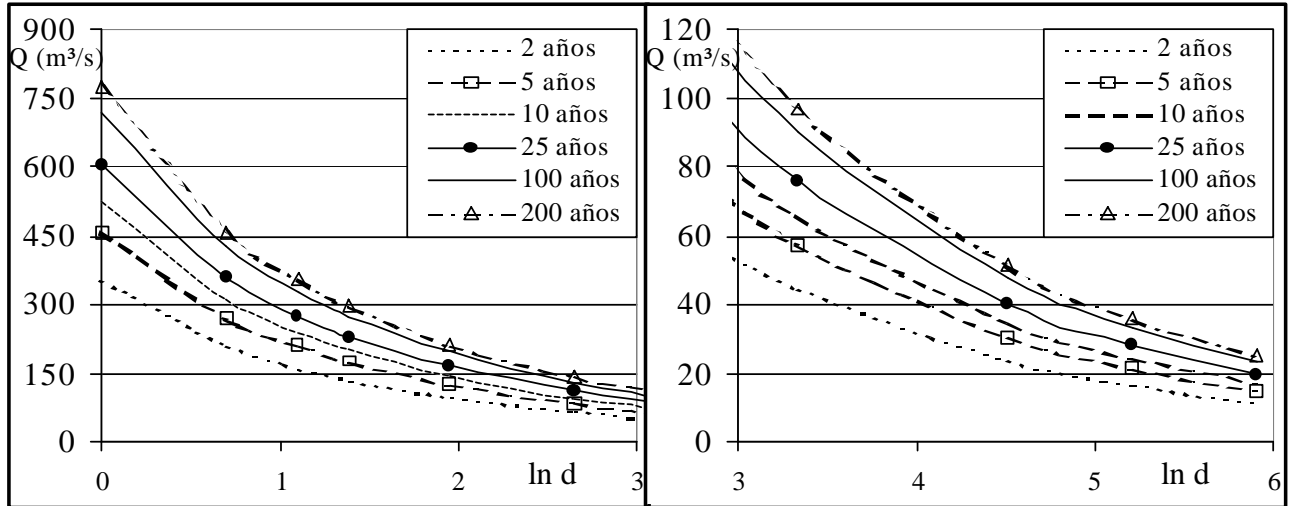


Figura 2: Relación Q-d-T, estimada con el modelo DIT, embalse San Roque.

En cambio, para el embalse Los Molinos, el valor de q , para la regresión sobre la expresión (3) conduce a un coeficiente de determinación $R^2 = 0,99777$ y los restantes parámetros del modelo adquieren los siguientes valores:

$$A = 0,2305; \quad B = 0,6245 \quad \text{y} \quad C = 5,6608$$

La gráfica de la función Q-d-T del DIT para este embalse, son presentadas en la figura 7.

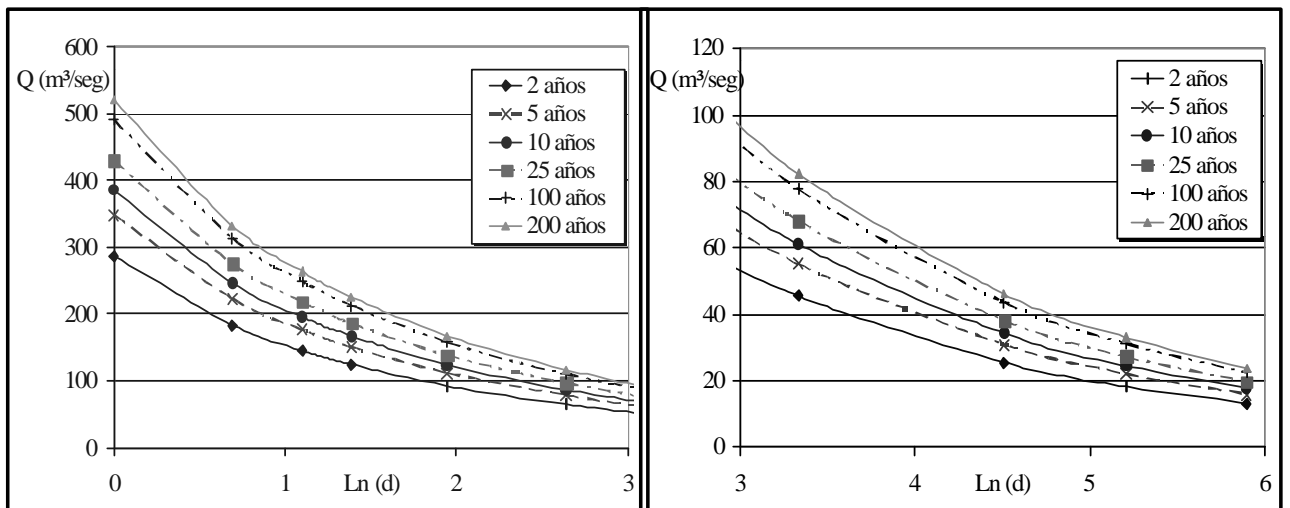


Figura 2: Relación Q-d-T estimada del modelo DIT, embalse Los Molinos.

PREDICCIÓN DE ESCENARIOS CRÍTICOS EN LOS EMBALSES

En Caamaño, Catalini (2002), Catalini (2004) se presentó la técnica de estimación del máximo caudal medio afluente a un lago o embalse, con una recurrencia dada, y para una duración determinada del evento. No obstante, el volumen de agua que ingresa al embalse no basta, por sí mismo, para determinar la cota alcanzada por la superficie del espejo de agua en ese lapso.

Razón por la cual, es necesario poner en juego otros elementos, como son; la duración del evento, el estado inicial que estará el embalse cuando acontezca el evento hipotético crítico, las condiciones de manejo de las descargas y cómo se distribuirán los aportes en el tiempo.

A diferencia del caudal medio entrante, no se tiene un modelo estadístico de estos factores, por lo que es necesario el planteo de hipótesis para los mismos. La evaluación de sus probabilidades de ocurrencia conjunta, entre sí y con el ingreso puede ser una forma, pero no la única.

Por estos motivos, y con la finalidad de predecir la secuencia de cotas que alcanzarán los embalses ante las distintas situaciones, se desarrolló una herramienta computacional, en lenguaje Visual Basic.Net. La cual permite modelar el comportamiento de los embalses San Roque y Los Molinos, ante los ingresos de agua que ocurrirían en eventos críticos. Para ello, el algoritmo computacional (ó MEHC-SRLM) emplea el modelo DIT, adaptado para embalses, (Caamaño, Catalini (2002) y Catalini (2004)), y asume distintas suposiciones de ingreso y manejo del embalse.

Por lo que, para poder confeccionar los mapas de riesgo hídrico fue necesario el planteo de algunas hipótesis, que serán presentadas a continuación.

Duración hipotética del evento a analizar; a través de la observación de la serie histórica de niveles, se pudo establecer la conveniencia de emplear como eventos representativos, a aquellos que abarcasen periodos de uno a cuatro días, lo cual resulta representativo del tiempo de reacción de ambos embalses.

Determinación de la cota inicial del embalse; uno de los factores determinantes para la predicción del movimiento del embalse es la cota inicial de modelación. Este factor, en un primer paso, se lo intentó determinar mediante el análisis estadístico de la serie de niveles diarios, pero los resultados obtenidos mostraron que, ambos embalses, presentan una tendencia incremental de la altura del cuerpo de agua (casi 8 cm/año para el San Roque y 11 cm/año para Los Molinos).

Dado la imposibilidad de poder determinar una cota media representativa de la serie diaria de niveles del embalse, se recurrió a analizar los valores máximos, medios y mínimos anuales de la serie histórica de cada embalse. (Figuras 8 y 9).

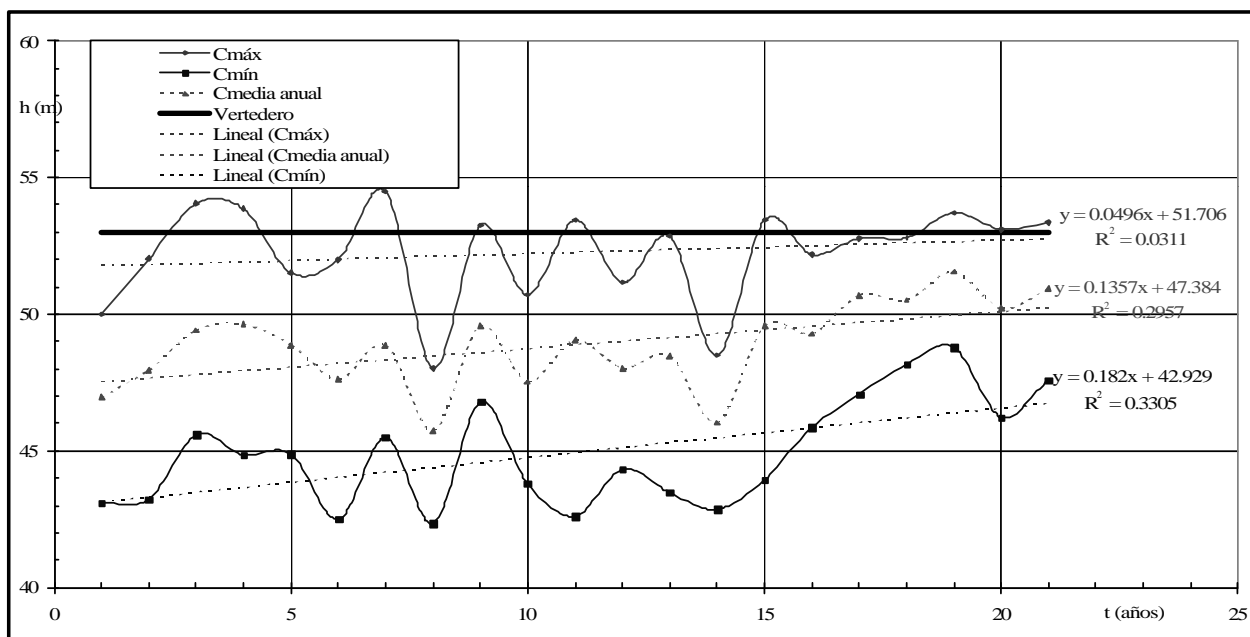
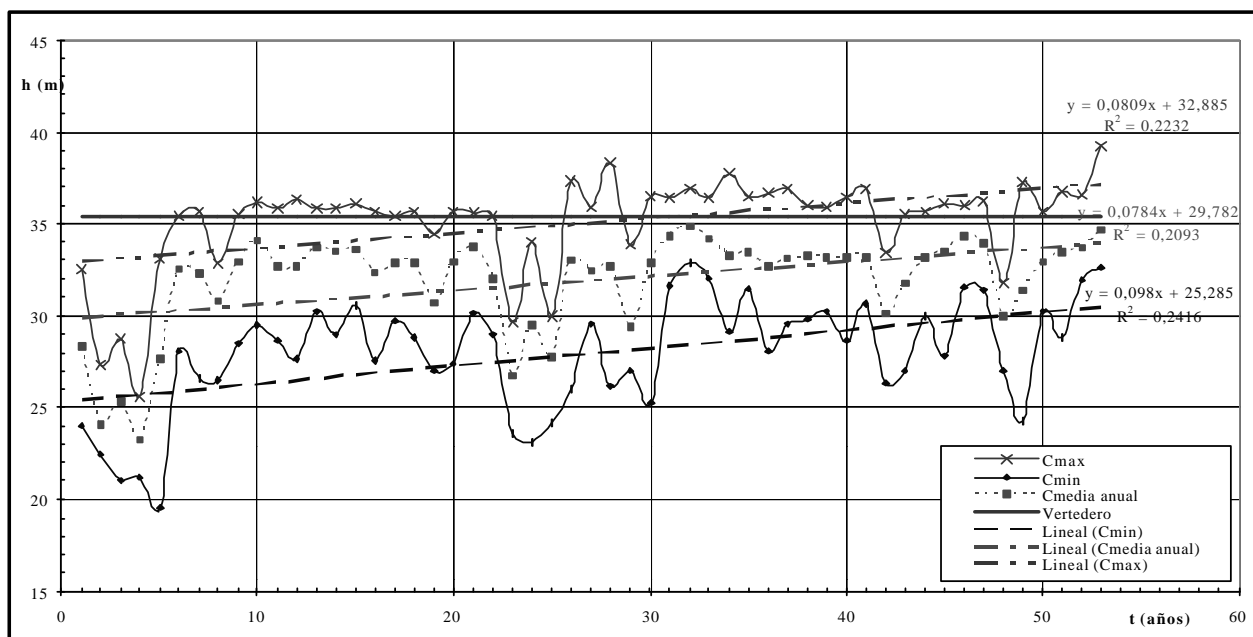


Figura 2: Series de niveles máximos, medios y mínimos anuales, embalse Los Molinos período 1981-2002.

Mediante este análisis, se pudo apreciar que la tendencia incremental presentada en la serie diaria, se sigue observando en ambos cuerpos de agua, tanto en los máximos, medios y mínimos anuales, siendo más fuerte este incremento en las cotas mínimas (en donde se alcanzan 9,8 cm/año en el San Roque y 18,2 cm/año en Los Molinos), mientras que para las cotas máximas se mantienen la tendencia observada en los valores diarios para el caso del San Roque. Esta tendencia, de seguirse manteniendo, provocara una disminución del rango existente entre cotas máximas y mínimas (del orden de los 6,75 m).

En cambio en el embalse Los Molinos, la serie de máximos, si bien sigue siendo creciente, disminuye significativamente con relación a la diaria.

Para la selección del valor inicial de modelación del San Roque, se decidió tomar un valor promedio entre los niveles datos por las expresiones de tendencia máxima y medias del ultimo año de la serie, con este criterio la cota obtenida fue de 35,40 m, la misma es solamente 10 cm. mayor a la cota del labio del vertedero, razón por la cual, se opto por emplear esta ultima como cota inicial de la modelación ($h_0=35,30$ m).

En cuanto al caso de Los Molinos, se opto por estar del lado de la seguridad y la cota de inicio de modelación se adopto en el labio del vertedero ($h_0=53,00$ m).

Determinación de las condiciones de manejo de las descargas; en ambos embalses, al analizar la serie histórica de descargas (válvulas y obra de toma), se pudo observar, que en ninguno de los casos respondió, como era de esperar, de forma homogénea a lo largo del tiempo, lo que denota la falta de una política de aprovechamiento de estos cuerpos de agua y que estas observaciones no son del todo ciertas.

Razón por la cual, el autor se vio en la necesidad de establecer algún criterio de manejo, por lo que se plantearon dos alternativas para el caso del embalse San Roque y una para Los Molinos.

En el caso del San Roque, la primer alternativa, supone una descarga por tomas del 100 % (24 m³/seg) y del 45% (36 m³/seg) por válvulas de fondo (siendo esta la adoptada para la confección del mapa de riesgo). Para el cálculo, esto equivale a 75% (60 m³/seg) de apertura de válvulas, con las tomas cerradas. En la segunda hipótesis plantea el 100% (24 m³/seg) de descarga por tomas y 90% (72 m³/seg) por válvulas de fondo.

En cambio, para el embalse Los Molinos, el autor no pudo constatar el correcto funcionamiento de las válvulas por lo que se opto como hipótesis de simulación que estas se encuentran cerradas y las salidas solo se producen por medio de la obra de toma y el vertedero.

DETERMINACIÓN DE LAS COTAS CON RECURRENCIA ASOCIADA

Teniendo en cuenta las hipótesis planteadas, solo resta la selección del modelo de ingresos de agua y las recurrencias a emplear, para que de esta manera, se puedan determinar las cotas con mayor riesgo ante la presencia de un evento hidrológico, de duración y recurrencia dadas.

Por lo que a tal fin, se probaron tres formas de la distribución de ingreso de agua, ellas se basaron en; aportes medios al inicio de la jornada, uniformes durante el transcurso del día y por último basándose en el hidrograma deducido del modelo DIT; siendo esta la alternativa empleada para la confección del mapa de riesgo, en ella, los ingresos son calculados por medio del DIT para cada día, entrando al embalse solo la diferencia de volumen existente entre días sucesivos, pues el resto ingreso durante la jornada previa.

Como última medida se seleccionaron 10 recurrencias para la predicción de la cota ha alcanzar por el espejo de agua, ellas fueron: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años.

La predicción de niveles se efectuó respetando las hipótesis planteadas y con el empleo de un paso de discretización de 1 hora. Las figuras 10 y 11, presenta las variaciones de nivel para las diez recurrencias analizadas pudiéndose observar los valores máximos obtenidos por medio de la modelación.

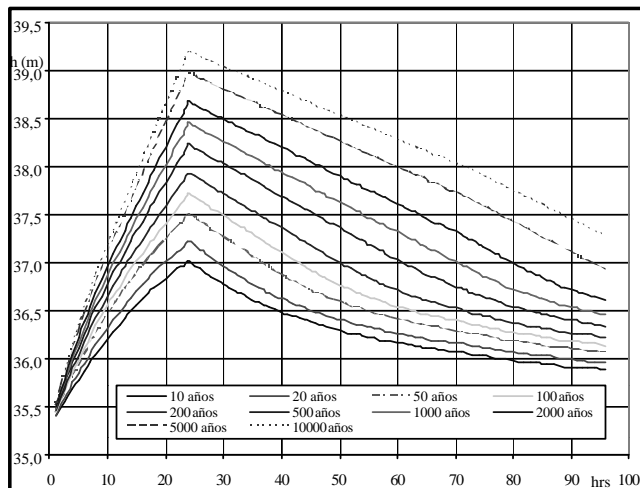


Figura 2: Modelación, embalse Los Molinos (Hipótesis de descarga 100% toma, 0 % válvulas).

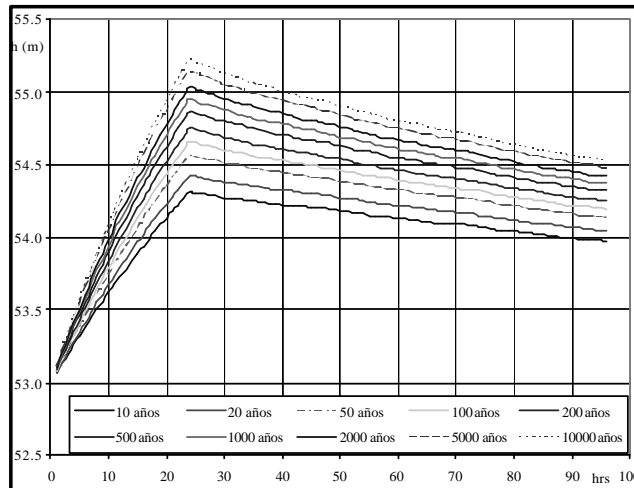


Figura 2: Modelación, embalse San Roque (Hipótesis de descarga 100% toma, 45% válvulas).

MAPAS DE RIESGO HÍDRICO CON RECURRENCIA ASOCIADA

Para la confección de los mapas de riesgos, se fijaron distintos niveles los cuales deben ser representativos de la amenaza hídrica existente en el perillago de cada embalse. En donde el nivel de riesgo, es definido como la probabilidad de que haya inundación al menos una vez en n años sucesivos.

Niveles de Riesgo - embalse San Roque

En base a la modelación realizada sobre este embalse, se procedió a la selección de los niveles de riesgo asociado, los cuales fueron definidos como; Alto, Medio, Bajo y Mínimo, teniendo los tres primeros asociados una recurrencia (T) y una cota (h), mientras que el último o de riesgo mínimo fue adoptado siguiendo los lineamientos del proyecto original de la presa en donde se establece que el embalse puede almacenar los volúmenes excedentes, hasta la cota del coronamiento (43,00 m).

Tabla 1: Niveles de Riesgo seleccionados para el emb. San Roque

Niveles de Riesgo	T (años)	Cota (m)	Dh	Riesgo % . N
Alto	10	37.01		10.00%
Medio	500	38.23	1.22	0.20%
Bajo	10000	39.19	0.96	0.10%
Mínimo	-----	43.00	0.81	

Niveles de Riesgo – embalse Los Molinos

En el caso del embalse Los Molinos, los niveles de riesgo seleccionados fueron tres, alto, bajo y mínimo a diferencia de los cuatro niveles del embalse San Roque. Esto es así, por que entre los requerimientos de proyecto de esta presa, no se establecieron los exigentes limitantes impuestos para la protección de la ciudad de Córdoba, en lo referente a la capacidad de evacuación de los excedentes hídricos, por lo cual la presa no presenta una revancha tan marcada y la laminación de la creciente es menor.

Tabla 2: Niveles de Riesgo seleccionados para el emb. Los Molinos

Niveles de Riesgo	T (años)	Cota (m)	h	Riesgo % . N
Alto	10	54.31		10.00%
Bajo	10000	55.22	0.91	0.01%
Mínimo	-----	58.00	2.78	

SUPERFICIES INUNDABLES

Tomando como base la cartografía y la información batimétrica digitalizada por el autor, se procedió a la generación por medio de extrapolación, mediante el método de Kriging, de las curvas de nivel de interés, para ambos embalses.

Embalse San Roque

Una vez que se obtuvieron las curvas de nivel, se realizó la determinación de las superficies del espejo de agua y la del perilago para los distintos niveles de riesgo asignados (Tabla 5) y a su vez se confeccionó el Mapa de Riesgo Hídrico para el perilago del embalse San Roque (Figura 12).

Tabla 3: Superficies del espejo de agua e inundables del perilago del embalse San Roque.

Cota (m)	35.30	37.01	38.23	39.19	43.00
Superficie del espejo de agua (km ²)	16.83	18.09	18.99	19.70	22.50
DA inundable (km ²)	---	1.259	0.898	0.707	2.806
Superficie inundable (Ha)	---	125.93	215.77	286.47	567.05

Además, se obtuvieron mediante el empleo de imágenes satelitales recientes, los valores de superficie urbanizada de la ciudad de Villa Carlos Paz, para de esta manera tener un valor referencial de los porcentajes de áreas urbanas en riesgo ante eventos hidrológicos críticos. De acuerdo a dichas mediciones se pudo obtener que la superficie urbanizada aproximada de Villa Carlos Paz es de 8,5 km² (850 Ha). A la vez se determinaron los siguientes parámetros de interés, con respecto a las superficies inundables. (Tabla 6)

Tabla 6: Superficies inundables para la ciudad de Villa Carlos Paz y porcentaje de áreas urbanas con riesgo de inundación.

Cota (m)	35.30	37.01	38.23	39.19	43.00
DA (km²)	---	0.618	0.365	0.277	1.452
Superficie inundable (Ha)	---	61.83	98.33	126.07	271.23
<i>% de Áreas urbanizadas con riesgo de inundación para Villa Carlos Paz</i>					
Con respecto al perilago (coronamiento)	---	10.90%	17.34%	22.23%	47.83%
Con respecto a la ciudad	---	7.27%	11.57%	14.83%	31.91%

Embalse Los Molinos

En el caso del embalse Los Molinos, las urbanizaciones en su perilago son muy recientes sobre todo en la zona de Potrero de Garay, siendo las más antiguas las Colonias de Vacaciones existentes sobre la margen Este.

En la figura 13, se presenta el mapa de riesgo correspondiente a este embalse, pero dadas las características del vaso, las curvas de nivel se encuentran muy próximas entre sí, por lo que solo se grafica el rango en donde se dan los niveles de Riesgo Hídrico seleccionados.



Figura 3: Mapa de Riesgo Hídrico con recurrencia asociada. Embalse San Roque.

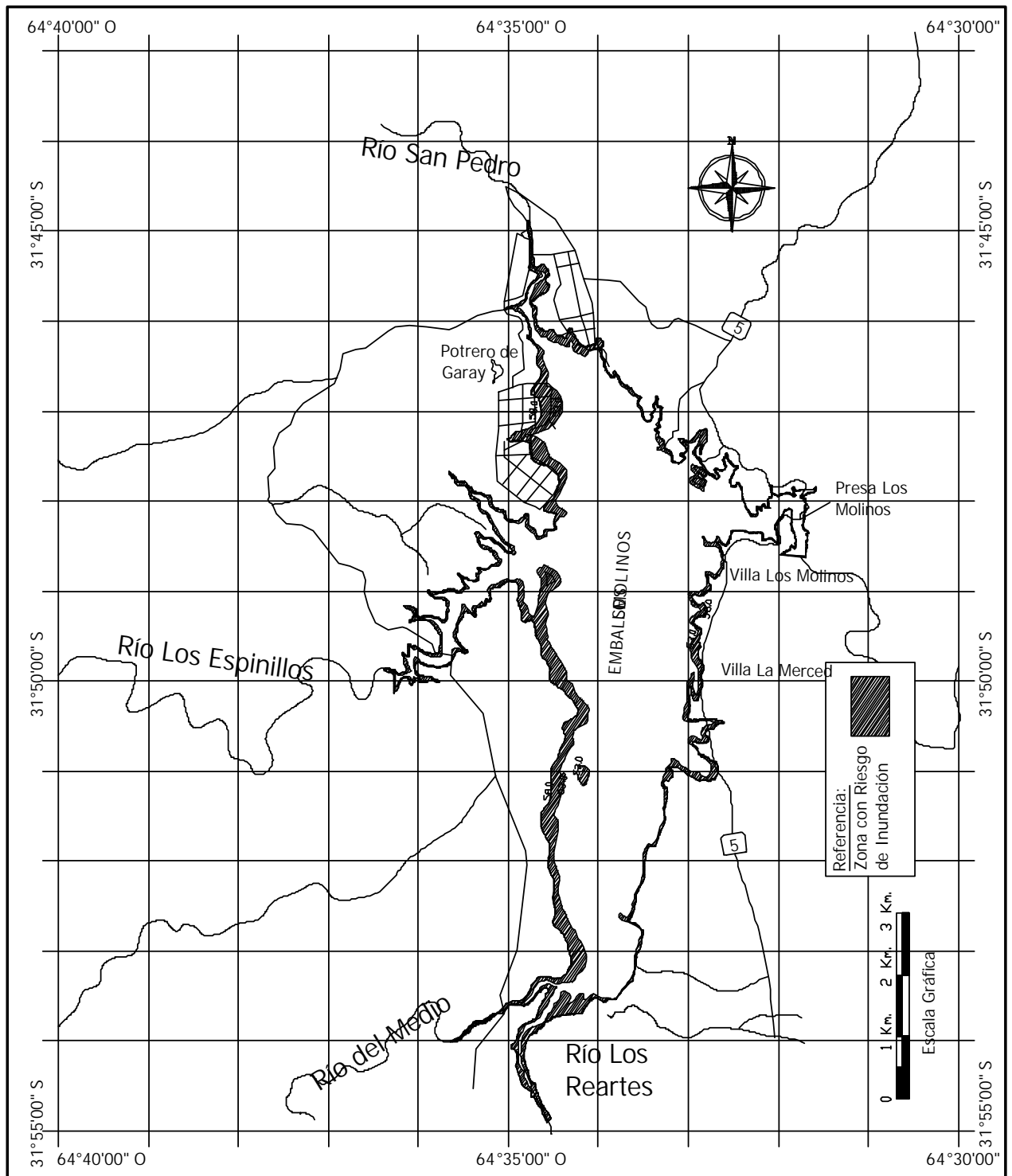


Figura 4: Mapa de Riesgo con recurrencia asociada. Embalse Los Molinos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que la familia de curvas de densidad probabilística lognormal reflejó con mucha precisión la variación del caudal entrante a los embalses, en función de la duración y la recurrencia de las crecientes.

Esto no sorprende en modo alguno, habida cuenta de que, si bien su empleo no es usual para el fenómeno que aquí se analiza, esta FDP ha demostrado su versatilidad en la estimación de valores máximos en procesos aleatorios naturales de muy diversa índole, que, en esencia, es lo que aquí se trata.

Asimismo, se aprecia que la aptitud del modelo DIT para simular en forma continua la relación tridimensional entre caudal, duración y período de retorno es digna de destacar.

Tal desempeño también era previsible, en vista de que este algoritmo emula el comportamiento lognormal, y no hace más que ratificar la calidad de la aproximación analítica, que ya había demostrado en el tratamiento de lluvias de diseño.

Estos nuevos resultados permiten asumir que la metodología desarrollada puede emplearse en otros sistemas de similares características.

En síntesis, las hipótesis de partida se han cumplido plenamente, porque:

- Es válido transformar el planteo intensidad-duración-recurrencia, que se utiliza habitualmente en la caracterización de lluvias de diseño, para predecir crecientes ingresantes a lagos y embalses a través de una relación Q-d-T, sin que ello altere la naturaleza del enfoque.
- Los estimadores de dicha relación ensayados en el presente estudio, es decir, una familia de FDP lognormales por duración y el modelo DIT, se adecuan perfectamente a esa transformación y constituyen herramientas idóneas para representar el proceso físico.

Con la exitosa adaptación del modelo DIT para representar la función Q-d-T, propuesta en este informe, y el software desarrollado para predecir escenarios críticos en embalses, se ha arribado a la información que caracteriza la amenaza de inundación en el embalse San Roque y Los Molinos. Ambos algoritmos constituyen potentes herramientas, cuyo uso puede ser generalizado para otros sistemas lacustres de la provincia.

En lo que se refiere al planteo de escenarios, la versatilidad del software MEHC-SRLM le permite aceptar pautas de estado inicial, de entrada y de salida muy diversas.

El empleo de este algoritmo para modelar un evento crítico ocurrido en el embalse San Roque, cuyos datos no habían ingresado en la calibración del modelo DIT, arrojó un error de 1,3 % entre con respecto a la cota observada, lo cual valida el empleo de esta herramienta de modelación.

Con respecto al ingreso, aunque siempre hay lugar para un estudio más profundo, se ha logrado reflejar el régimen en forma verosímil. Las descargas, y en cierta medida la situación de partida, por el contrario, al estar sometidas a exigencias humanas, han debido ser definidas mediante hipótesis de manejo razonables, pero no necesariamente consistentes con los criterios de los operadores reales, ya que no hay reglas explícitas de las que se tenga conocimiento.

Por su parte, al programa MEHC-SRLM, se le realizó un análisis de sensibilidad a la variación del paso de cálculo, cuyos resultados indican que la sensibilidad a esta variable solo es importante para pasos grandes (de más de 8 horas), no así para pasos de tiempos menores a la hora.

Recomendaciones

La evaluación de las amenazas de inundación se ha desarrollado desde dos vertientes, una basada en la geomorfología y otra en la estadística hidrológica. Si bien responde a este último enfoque, los mapas de riesgo hídrico del perilago del Embalse San Roque y Los Molinos, asocia *eventos hidrológicos críticos*, de recurrencias dadas, con *información cartográfica*, delimitando las zonas que presentan distintos niveles de amenaza y constituye una herramienta útil para todos aquellos entes encargados de planificar, gestionar y determinar el uso del territorio.

El mapa de riesgo del embalse San Roque permite advertir que la cota de edificación se ha fijado demasiado baja para la localidad de Villa Carlos Paz (36 m), por lo que se sugiere elevarla al menos a cota 38 m, para que de esta forma se impidan nuevas construcciones en áreas que poseen un elevado grado de amenaza.

Al adoptar esta cota, no se disminuiría la zona en riesgo de Villa Carlos Paz, debido a que las edificaciones fueron aprobadas en su debido momento por la Municipalidad sin un plan de ordenamiento urbano, pero sí en el resto del perilago, sobre todo en la zona de la comuna de San Roque, en la margen noreste del embalse.

Adoptando esta propuesta, el espacio inundable del perilago entre las cotas 36 y 38 sería de 200 Ha de las cuales aproximadamente 94 Ha corresponden a la actual área urbana de Villa Carlos Paz. Esto representa el 47% de la potencial zona de inundación, por lo que fijando la cota 38 como límite se mantendrían libres de riesgo unas 106 Ha.

También sería conveniente ampliar el actual sistema de alerta de crecidas en tiempo real del río San Antonio al resto de la cuenca de aporte, teniendo en cuenta el elevado valor inmobiliario de la zona afectable (sobre todo la ciudad de Villa Carlos Paz).

No obstante el avance alcanzado, corresponde recomendar la realización de campañas que permitan actualizar las bases de datos topográficos y batimétricos de ambos embalses, su perilago y entorno. Esto se debe a que el último relevamiento topográfico realizado en el San Roque data de la década del 60' presentando falencias en la confiabilidad en ciertos sectores.

Por su parte la situación de la información batimétrica de este embalse, no es mucho mejor, debido a que el último relevamiento fue realizado por el CIHRSA en 1987, no disponiéndose de la información original. Una situación de igual índole se da en el Embalse Los Molinos, en donde el último relevamiento batimétrico fue realizado en 1972 y solamente de forma expeditiva.

BIBLIOGRAFÍA

- Caamaño Nelli, G. y García, C.M.** (1994) *“El Vínculo entre Pluviometría Máxima y su Recurrencia a Escala Regional”*. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. AIIH. Santiago, Chile.
- Caamaño Nelli, G. y García, C.M.** (1997) *“Estimación de Máximos en Hidrología: Factores de Frecuencia Normal y Lognormal”*. Cuadernos del CURIHAM. Año 3. N° 3. pp. 1-17. Rosario, Republica Argentina.
- Caamaño Nelli, G. y García, C.M.** (1999) *“Relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: Enfoque a través del factor de frecuencia - caso lognormal”*. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIV, N° 3, pp.37-44. DF, México.
- Caamaño Nelli, G. y Catalini, C.G.** (2002) *“Adaptación de Técnicas para estimar lluvias de diseño a la predicción de crecientes en lagos y embalses”*. XIX Congreso Nacional del Agua. Artículo Completo: ISBN 987-20378-1-7, CD. Resumen: ISBN 987-20378-0-9, pp. 43-44. Comité Permanente de los Congresos del Agua. Villa Carlos Paz. Republica Argentina.
- Caamaño Nelli, G., Colladon, L. y García, C.M.** (2002) *“Criterios de Selección del Nivel de Diseño Hidrológico para Lluvias”*. Presentado para el XIX Congreso Nacional del Agua. Córdoba, Republica Argentina.
- Catalini, C.G.** (2003); *“Predicción de Ingresos de Agua al Embalse San Roque”*, Informe de Pasantía, Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida. Villa Carlos Paz, Republica Argentina.
- Catalini, C.G.** (2004); *“Predicción de Crecientes en Embalses de Córdoba”*, Informe de Beca Especial convocatoria 2002 Agencia Córdoba Ciencia, S.E.
- Catalini, C.G y Caamaño Nelli, G.E.** (2004): *“Predicción de Crecientes en Embalses, Caso Los Molinos, Córdoba, Argentina”*. XXI Congreso Latinoamericano de Hidraulica. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.
- Catalini, C.G y Caamaño Nelli, G.E.** (2004): *“Mapa de Riesgo Hídrico con Recurrencia Asociada, Embalse San Roque, Córdoba, Argentina”*. XXI Congreso Latinoamericano de Hidraulica. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.