

APROXIMACIONES DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL EN EL EMBALSE LOS MOLINOS (CÓRDOBA, ARGENTINA)

Javier E. Piccolo^(1,2), Clarita M. Dasso^(1,2) y Mariano A. Corral⁽²⁾

⁽¹⁾Centro de la Región Semiárida (CIRSA) - Instituto Nacional del Agua (INA)

⁽²⁾Laboratorio de Hidráulica F.C.E.F.yN.- Universidad Nacional de Córdoba

⁽¹⁾Ambrosio Olmos 1142 -X5000JGT, Córdoba, Argentina

TE: (351)-4683015 o 4682781. E-mail: cclasso@efn.uncor.edu

RESUMEN

Las obras destinadas a embalsar el agua dulce deben proyectarse lo más racional posible, a fin de minimizar los impactos ambientales y de optimizar el uso del recurso ante las múltiples demandas. El gerenciamiento de ese recurso genera conflictos entre los distintos intereses, que sólo puede solucionarse con un correcto plan de gestión que resuelva la encrucijada entre la única oferta y las distintas demandas. Para ello se requiere conocer la disponibilidad hídrica. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de las distintas alternativas de balance hídrico planteadas para el Embalse Los Molinos (Córdoba, Argentina) con el propósito de cuantificar la reserva hídrica en el tiempo, para su correcta explotación. Este embalse, con capacidad de 307 Hm³ a cota de vertedero, es actualmente el segundo abastecedor de agua a la Ciudad de Córdoba, aportando un tercio de la demanda. Entre sus diversos usos se destaca la generación de energía y la atenuación de crecidas. La cuenca de aporte, desarrollada sobre la vertiente oriental de las Sierras Grandes de Córdoba, presenta cuatro importantes tributarios que integran una superficie de 916 Km². La ausencia de control fluviométrico en estas cuencas y el corto período con información simultánea de las variables intervinientes en el balance, condicionó las distintas opciones empleadas. El modelo fue planteado en términos de variación de volúmenes de agua (*DV*), dado entre los volúmenes aportados por los tributarios más el de la precipitación sobre el espejo de agua, y los volúmenes erogados por evaporación y por el emisario. El balance se realizó por aproximaciones sucesivas ajustando distintas hipótesis tanto en forma secuencial, como con valores medios. Se trabajó a paso mensual, para el período comprendido entre enero de 1981 y junio de 1987. Se analizaron dos alternativas para el balance medio y seis para el balance seriado. Se compararon los resultados entre los *DV* modelados y los *DV* medidos. Los balances medios fueron buenos indicadores de las reservas, aunque los seriados lograron una mejor representación del proceso evolutivo de las mismas. La diferencia final fue de 111,2 Hm³ en déficit, que en términos de embalse representa 0,05 embalses por año.

Palabras clave: balance hídrico seriado, balance hídrico medio, reserva hídrica, embalse.

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento muy abundante en la Tierra cubriendo el 71% de su superficie. Sin embargo, no toda está disponible para los seres humanos, animales y plantas, ya que los costos para poder disponer de ella, son excesivamente altos. Se estima que el 97% del agua se encuentra en los océanos y que sólo el 3% es agua dulce. Del total de agua en el mundo, sólo un 0,3% se encuentra en lagos, ríos y acuíferos por lo que debe ser considerada como un recurso escaso.

Además de esto, existen diferencias marcadas en la cantidad de precipitación anual en las diversas partes del mundo y durante las distintas estaciones del año. Esto lleva al hombre a producir intervenciones hidráulicas para disponer de este recurso de manera continua durante todo el año, especialmente en zonas áridas y semiáridas.

Por otra parte, los lagos, embalses y corrientes fluviales, las fuentes más valiosas de agua potable para la población del planeta, son vulnerables a la contaminación y al deterioro de la calidad de sus aguas. Es por esto que las obras hidráulicas se deben hacer de la forma más racional posible, para minimizar los impactos ambientales y optimizar el uso del recurso ante las distintas demandas, como el agua potable, la energía hidroeléctrica, el uso recreativo-turístico, el riego y otras.

La Provincia de Córdoba, por la acelerada y creciente demanda de agua de los distintos sectores, a volcado de manera precursora en el país, su esfuerzo en la tarea de regulación de los cursos de agua. Es así que, desde 1887 (año de la promulgación de una Ley Provincial en esta materia) hasta la actualidad, se han ejecutado más de 20 presas en todo su territorio, encontrándose hoy entre las provincias con más alto grado de regulación de sus recursos hídricos superficiales.

En el caso particular del Embalse Los Molinos, con diferentes usos (generación de energía, atenuación de crecidas, riego, uso recreativo y actualmente provisión de agua para la ciudad de Córdoba), se generan conflictos entre los distintos intereses que sólo se solucionarán con un correcto plan de gestión del recurso. El planeamiento es la solución a esta complicada encrucijada entre la única oferta y las distintas demandas, para lo cual es necesario cuantificar el recurso hídrico mediante un balance hídrico.

A fin de evaluar racionalmente la disponibilidad de agua, en este estudio se presenta un modelo de balance hídrico para el Embalse Los Molinos diseñado con el propósito de cuantificar las reservas de agua en el tiempo para su correcta explotación..

El modelo se plantea en términos de variación de volúmenes de agua (DV), dado entre los volúmenes aportados por los tributarios mas el de la precipitación sobre el espejo de agua, y los volúmenes erogados por evaporación y por el emisario. La ausencia de control fluviométrico en las cuencas de aporte y el corto período con información simultánea de las variables intervinientes condicionó la estructura empleada.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FÍSICO

El sistema físico en estudio comprende el embalse y su cuenca de aporte. Se describen a continuación las principales propiedades físicas, geomorfológicas y fisiográficas de las cuencas de aporte y las características físicas, topográficas y técnicas del embalse y su presa.

Cuenca de aporte al Embalse Los Molinos

La cuenca de aporte del embalse Los Molinos, con una superficie de 916 km² se encuentra enclavada entre los cordones de las Cumbres de Achala y de las Sierras Chicas (Cumbres del Hinojo) en el ámbito de las Sierras Pampeanas de Córdoba, incluyendo al Valle de Los Reartes, lugar donde se emplaza la presa de Los Molinos. Limitada al Norte por cordones montañosos y al Sur por las ondulaciones del borde de la Pampa de Los Reartes; siendo sus límites en coordenadas geográficas, los paralelos 31° 43' y 32° 00' y los meridianos de 64° 29' y 64° 56'.

Políticamente, esta cuenca abarca parte de los departamentos de Calamuchita, San Alberto y Santa María, en la Provincia de Córdoba. En la Figura 1 se muestra la cuenca con su ubicación regional y geográfica respectivamente.

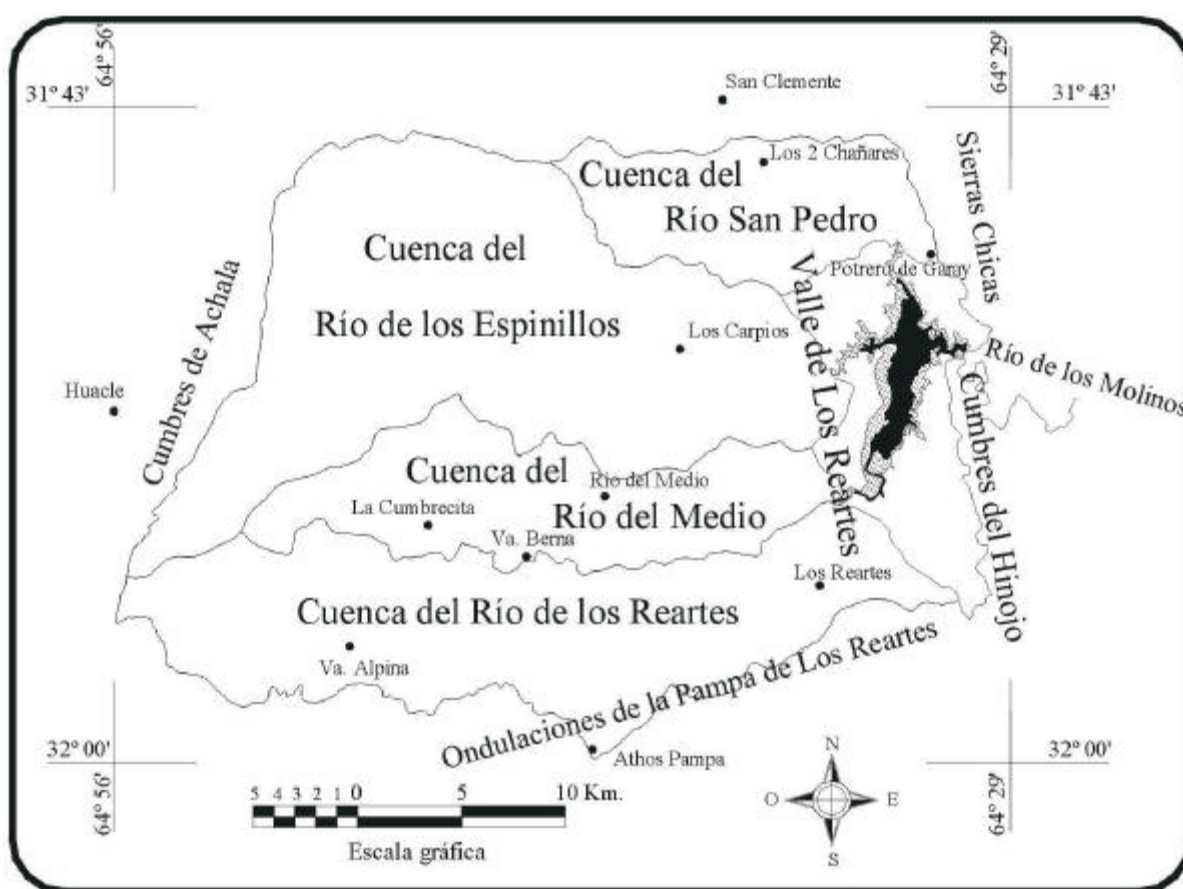


Figura 1: Ubicación geográfica y límites de la Cuenca del Embalse Los Molinos

La cuenca de aporte al Embalse Los Molinos, se compone de cuatro grandes tributarios: los ríos San Pedro, de los Espinillos, del Medio y de los Reartes y de un área de aporte directo: el Perilago.

El Río San Pedro es el menor de los cuatro tributarios, evacuando el agua de un área de 96 Km². Está ubicado en la parte noreste de la cuenca, con nacimiento en el borde oriental de la Cumbre de Achala, al sur de la Cuesta del Ángel a 1.900 m.s.n.m. El Río de Los Espinillos, por su parte, es el de mayor área de aporte, con 344,3 Km², formado por la unión de los ríos Corralejo y Yatán. El Río Del Medio presenta una cuenca alargada y encajonada de 132,6 Km², naciendo en el

sector de la Cumbre de Achala, más exactamente entre el Alto Grande y el Alto del Chicharrón a 2.200 m. s.n.m. El Río de Los Reartes, recoge el agua de la parte Sur de la cuenca, con un área de aporte de 246 Km². Nace en las Cumbres Achala, entre los cerros de La Ventana (2.410 m. s.n.m.) y Negro, donde confluyen pequeños torrentes que generan este tributario. Antiguamente, la unión del Río Del Medio y el de Los Reartes daba nacimiento al Río Del Potrero, que confluía posteriormente con el Espinillos para formar el Río de Los Molinos que cruzaba la Quebrada del Potrero de Garay, zona actualmente cubierta por el Embalse Los Molinos.

Por último, el área del Perilago es aproximadamente 97 Km² incluido el espejo de agua. El área de este es variable de acuerdo a la cota del embalse, presentando un área mínima de aproximadamente 74 Km², y una máxima de 86 Km². De las Cumbres del Hinojo contribuyen también varios torrentes y arroyos siendo pocos los de carácter perennes.

El clima de la región es típico de la zona templada, con características mediterráneas y de gran uniformidad térmica. La vegetación de bosque serrano, arbustal y pastizales de altura acompaña las condiciones climáticas reinantes. Los suelos siguen el relieve general de las cuencas, siendo de escasa profundidad en las partes altas y de topografía accidentada, con actividad agropecuaria y de mayor desarrollo en los valles donde queda confinado el uso para agricultura.

En base a antecedentes cartográficos, se generó por compilación y restitución el Mapa Base de la cuenca a Escala 1:50.000 con curvas de nivel equidistantes cada 100 metros donde se definió su sistema de drenaje. Se determinaron los principales parámetros físicos y geomorfológicos que inciden en el comportamiento hidrológico teniendo en cuenta aspectos lineales, areales y de relieve de las cuencas, tales como parámetros de forma, pendientes y otros. Se sistematizaron sus sistemas de drenaje determinando el orden y la magnitud. La Tabla 1 resume estos parámetros.

Tabla 1: Parámetros físicos y geomorfológicos de las cuencas de aporte

Parámetros	Los Molinos	San Pedro	Los Espinillos	Del Medio	Los Reartes	Perilago
Área, Km ²	915,9	95,9	344,3	132,6	246,0	97,0
Perímetro, Km	141,6	49,3	102,8	73,5	105,7	55,5
Diámetro, Km	42,7	17,2	35,3	29,03	35,2	12,8
Índice de Compacidad (K _c), adim	1,31	1,41	1,55	1,78	1,88	1,57
Factor de Forma (R _f), Adim	0,205	0,154	0,108	0,057	0,085	-
Relación de Elongación (R _e), adim	0,511	0,442	0,370	0,269	0,329	-
Relación de Circularidad (R _d), adim	0,574	0,497	0,409	0,309	0,277	0,396
Orden de la cuenca (Ω)	-	5	6	5	5	-
Magnitud de la cuenca (μ)	-	182	509	187	287	-
Número Total de Cursos	-	421	1160	427	658	-
Frecuencia de Drenaje (F _D) ríos/Km ²	-	4,4	3,4	3,2	2,7	-
Relación de Bifurcación (R _B), adim	-	3,68	3,75	3,59	3,42	-
Altitud Media de la Cuenca (h _m), msnm	1.363,3	-	-	-	-	-
Altitud de las Nacientes, msnm	2.515	1.950	2.440	2.100	2.515	1.210
Longitud del Cauce Principal (L _m), Km	66,78	25,05	56,52	48,31	53,71	-
Pendiente Media de la Cuenca (I _{mc}), %	23,24	-	-	-	-	-
Pend. Media del Cauce Principal (I _m), %	2,62	4,73	2,96	2,78	3,25	-
Pend. Discreta del Cauce Principal (I _{md}), %	2,57	4,29	2,97	2,80	3,63	-

Embalse Los Molinos

En la parte mas deprimida del Valle de Los Reartes, se localiza el embalse de Los Molinos de forma romboidal elongado Norte-Sur, con una longitud Norte-Sur de 12 Km y un ancho máximo Este-Oeste, de 3 Km en su parte Norte-centro. En la Figura 2 se puede observar su morfometría desde una imagen satelital.

Este embalse, fue proyectado para generar energía hidroeléctrica, atenuar las crecidas y para riego. Posteriormente con la creciente demanda de agua de la ciudad de Córdoba, se construye el canal Los Molinos-Bower, por lo que se suma a las consideraciones de proyecto la de proveer agua cruda para riego en el cinturón verde Sur de la ciudad de Córdoba y para la posterior potabilización en la planta Bower. Además de estas demandas, hay que citar el creciente uso recreativo-turístico del embalse en los últimos 15 años.



Figura 2: Foto Satelital del Embalse Los Molinos

Para describir su relieve de fondo solo se dispone de un relevamiento topográfico realizado en el vaso antes de la construcción de la presa y de una batimetría expeditiva realizada en 1975 mediante un ecógrafo portátil (Drago y Depetris, 1975).

La capacidad del embalse funcionando a nivel de la cresta del vertedero (cota 765 m .s.n.m.) es de 307 Hm³, formando un espejo de agua con superficie de 2.111 Ha. y con cota máxima (769 m. s.n.m.) es de 399 Hm³, con un área correspondiente de 2.451 Ha.

Presa Los Molinos N° 1

La presa Los Molinos N° 1 se encuentra en plena Sierras Chicas, más precisamente cerrando una profunda garganta que corta a la Cumbres del Hinojo, con coordenadas geográficas: 31°50' latitud Sur y 64°25' longitud Oeste.

El tipo de presa construido es del tipo arco a arco constante y radio variable. Los elementos de descarga de crecidas son dos, un vertedero del tipo Creager con salida en salto de sky, ubicado en el mismo muro de la presa en la parte central del arco con su cresta a cota 765 m. s.n.m., con capacidad de descarga máxima de 660 m³/s y dos descargadores de fondo a cota 736 m. s.n.m. de diámetro 1,10 m.

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN BÁSICA

Para definir el período de análisis del modelo y de las variables a tener presente en la estructura del mismo, fue necesario como primer medida hacer un relevamiento de las mediciones hidrometeorológicas e hidrológicas que se contaban en la región. Como resultado de esa búsqueda pudo advertirse que respecto a la primeras se contaba con información básica de lluvia y temperaturas, muy dispersas y discontinuas, pero factibles de reconstruir series temporales. En cambio, para los aspectos hidrológicos no existen registros hidrométricos sistemáticos ni de caudales, en ninguna de las cuencas de aporte al lago, las cuales debieron ser tratadas en el análisis por métodos indirectos, también de balance, para estimar la escorrentía superficial.

La información de lluvia es sólo histórica (no registran en la actualidad) y abarca 39 años comprendidos entre 1940/41 a 1979/80 en más de 8 estaciones pluviométricas; las estaciones de temperatura, también en las mismas condiciones que las anteriores, presentan registros de 20 años (desde el año 1967 a 1988) es decir, con un desfase de las de lluvia de 17 años aproximadamente; los niveles del lago y los caudales erogados, en cambio, se tienen registros hasta la fecha pero recién a partir del año 1981.

En síntesis, no se cuenta con un período de simultaneidad de las mediciones, por lo que fue necesario para implementar el balance en el Embalse Los Molinos, extender las series de lluvia y así lograr un período, aunque corto, común a todas ellas. Ese período comprende seis años y medio (78 meses) continuos desde enero de 1981 a junio de 1987.

La información hidrometeorológica (lluvias y temperaturas) fue recopilada y procesada con la finalidad de que los datos reunieran requisitos mínimos de calidad y de temporalidad común entre ellos, para ser utilizados especialmente en el cálculo de la escorrentía superficial de las cuencas de aporte. La secuencia metodológica consistió básicamente en tres etapas de análisis a) la recopilación y carga en soporte magnético de los datos, b) la detección y rellenamiento de los datos y c) el control de calidad mediante tests de homogeneidad.

Precipitación

Se identificaron más de 15 estaciones pluviométricas de la cuenca y zonas colindantes y se cargaron en formato magnético. Posteriormente se rellenaron los datos faltantes con distintas técnicas de acuerdo a la información disponible, al período a rellenar y a la información de las estaciones vecinas (regresiones lineales, método regional y método del entorno promedio). A partir

de las técnicas explicadas se obtuvieron series de diferentes longitudes en función de la necesidad de uso para las posibles alternativas de balance en cuenca a plantear. La homogeneidad temporal fue analizada mediante los test de las rachas, de Helmert o de permanencia y el de Mann-Kendall.

La lluvia media areal se calculó a través del Modelo de Thiessen de distribución espacial. Se diagramaron distintas configuraciones que fueron utilizados para estimar los aportes por balance en la cuencas. La figura 3 muestra la configuración utilizada para el período del balance en el lago.

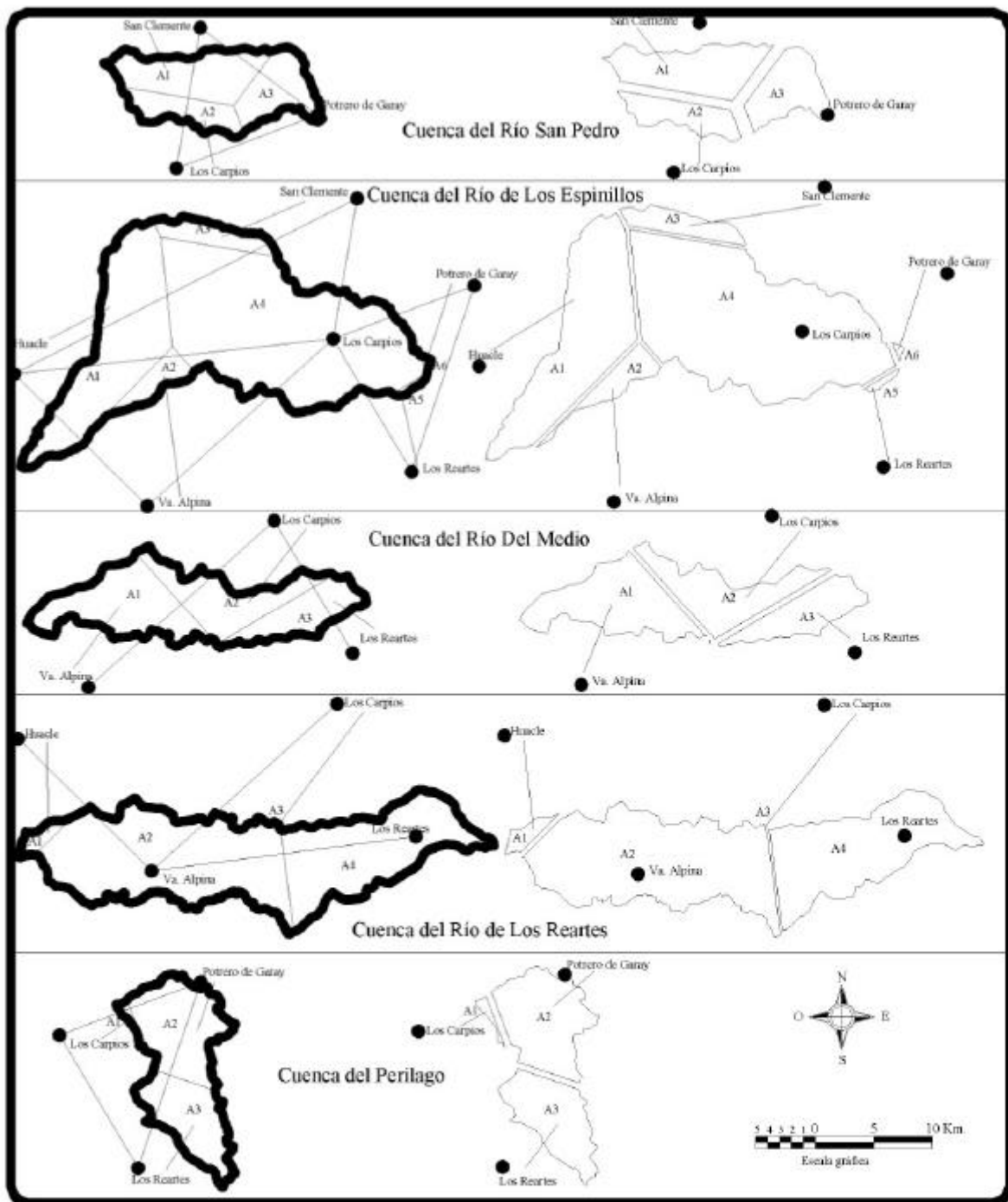


Figura 3: Configuración de Thiessen con 6 estaciones pluviométricas para la serie 1981/1987

Temperatura

En el tratamiento de datos térmicos se procedió de igual manera que con las series pluviométricas, pero debido a la escasa variación de la temperatura entre las tres series relevadas, se adoptó como representativa la serie registrada en Athos Pampa, por su extensión y su continuidad. Está situada a una altitud de 1.250 m.s.n.m., altura muy similar a la altura promedio de la cuenca (1.363,29 m.s.n.m.). En la Tabla 2 se presentan las temperaturas medias mensuales y anual de la serie de 20 años comprendidos en el período 1967/68 - considerada.

Tabla 2: Series de Temperaturas Medias Mensuales y Anual en la Estación Athos Pampa

Año	Mes												Media
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	
1967-1968	7,5	8,2	11,1	14,4	15,9	18	18,9	20,6	16,5	11,9	9,0	7,6	13,3
1968-1969	9,1	9,4	11,1	13,9	20,3	18,7	21,4	20,1	17,2	15,5	12,3	7,6	14,7
1969-1970	8,1	7,9	12,7	15,5	17,6	20,8	18,9	19,8	17,1	17,0	10,6	7,3	14,4
1970-1971	7,5	8,2	11,1	14,4	15,9	18,0	22,0	17,9	16,4	13,7	10,6	7,3	13,6
1971-1972	7,5	8,2	14,1	15,8	19,8	23,0	18,9	17,9	16,3	13,4	11,8	8,6	14,6
1972-1973	6,8	8,2	12,1	13,9	16,3	19,3	20,1	19,2	18,0	14,3	9,5	8,5	13,8
1973-1974	5,7	7,6	10,8	15,4	15,6	17,4	20,5	17,0	15,6	14,1	10,6	7,6	13,2
1974-1975	8,6	7,9	9,3	14,4	16,3	16,5	19,3	18,2	16,1	14,8	10,6	7,3	13,3
1975-1976	7,5	8,2	11,1	14,4	15,9	18,0	18,9	20,2	14,2	12,0	9,0	7,0	13,0
1976-1977	6,5	7,1	9,8	13,3	15,8	17,7	18,6	17,8	16,2	13,5	9,6	8,7	12,9
1977-1978	8,0	8,4	12,6	15,4	16,2	18,0	18,2	16,9	16,6	13,3	10,8	6,9	13,4
1978-1979	9,0	7,7	11,7	14,1	16,3	18,1	19,1	17,3	18,7	13,6	10,6	7,3	13,6
1979-1980	8,0	10,1	9,0	13,8	14,8	17,3	19,1	18,0	16,4	13,7	11,5	6,6	13,2
1980-1981	7,8	9,1	10,6	12,7	15,6	17,8	18,0	18,4	16,5	13,5	12,1	6,3	13,2
1981-1982	6,4	10,2	10,4	14,0	14,5	17,0	18,2	16,3	15,4	13,4	11,1	6,8	12,8
1982-1983	7,2	9,9	12,3	14,7	15,1	18,3	18,6	16,3	16,3	13,7	9,7	5,8	13,2
1983-1984	6,1	7,5	9,1	15,3	16,1	19,3	19,3	18,4	16,3	11,7	9,8	4,9	12,8
1984-1985	7,0	6,9	10,7	15,0	15,2	14,6	17,0	17,0	16,1	13,0	11,8	9,3	12,8
1985-1986	7,2	8,2	10,4	13,6	16,7	18,2	18,1	17,0	15,4	13,8	10,8	9,0	13,2
1986-1987	8,7	8,4	11,7	13,3	15,4	18,5	18,8	18,1	16,4	13,7	10,6	7,3	13,4
Media Mensual	7,5	8,4	11,1	14,4	16,3	18,2	19,1	18,0	16,4	13,8	10,7	7,4	13,4

Temperatura de Bulbo Húmedo

Para el cálculo de la evaporación sobre el espejo de agua se requería conocer la diferencia psicrométrica, dada por la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la de bulbo húmedo. Esta variable fue tratada de forma similar a la de la temperatura. En la Tabla 3 se muestra la serie de temperaturas de bulbo húmedo obtenidas para la serie julio de 1.980 a junio de 1.987.

Tabla 3: Temperaturas mensuales de bulbo húmedo

Año	Mes												Media
	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	
1980-1981	4,6	6,0	6,0	9,3	11,7	14,8	16,1	16,6	14,7	12,3	10,0	4,4	12,3
1981-1982	5,1	7,1	6,0	10,6	12,9	14,8	15,4	14,0	13,7	12,1	9,3	5,6	10,5
1982-1983	5,3	7,0	9,7	10,9	11,5	15,1	16,4	14,8	14,2	11,8	8,0	3,5	10,7
1983-1984	3,6	5,3	6,0	11,0	13,2	15,9	16,9	16,5	14,3	9,8	7,7	3,1	10,3
1984-1985	4,6	4,0	8,6	11,4	12,7	13,1	15,0	15,2	13,7	10,2	9,3	7,1	10,4
1985-1986	4,9	5,8	8,2	11,1	14,6	15,9	15,6	14,7	13,1	12,1	8,6	6,3	10,9
1986-1987	6,9	6,2	8,9	10,9	13,0	16,3	16,9	15,9	14,0	11,4	8,8	5,0	11,2
Media Mensual	5,0	5,9	7,6	10,7	12,8	15,1	16,0	15,4	14,0	11,4	8,8	5,0	10,6

Caudales de aporte

Los aportes de las tributarios al lago, fueron deducidos a partir de los excesos calculados en los balances hídricos de subcuencas realizados por medio del Modelo Thornthwaite (Piccolo,2003). En dicho estudio antecedente, los aportes se obtuvieron utilizando distintas leyes de variación de la reserva útil, ley de VRU lineal y exponencial para el balance en cuenca medio, y la lineal para el balance de cuenca seriado para una serie de 20 años comprendidos en el período jun 1967- jul 1987.

Para la determinación de la escorrentía superficial Thornthwaite propone una expresión simple y práctica en la cual relaciona directamente los excesos del balance con las escorrentías superficiales hacia los ríos. Esta ley empírica se aproxima a la curva de abatimiento normal del flujo, tomando la forma del decaimiento exponencial.

Con la finalidad de adaptarla a las condiciones locales del comportamiento hidrológico de las cuencas, Piccolo (2.003) ajustó otra ley de decaimiento empírica de similar forma, pero con diferentes coeficientes de decaimiento temporal basada en la hipótesis que en esta región, las precipitaciones son generalmente líquidas y estivales, por ende el agua al saturar el suelo es liberada más rápidamente, convirtiéndose en escurrimientos hacia los ríos de una manera más abrupta. Con estas leyes de decaimiento es posible estimar las escorrentías, y luego obtener los volúmenes aportados en $[Hm^3]$ al multiplicar estas escorrentías por el área de cada subcuenca de aporte.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la tasa de decaimiento mensual de los excesos hídricos formulada por Thornthwaite y la adaptada para las condiciones locales.

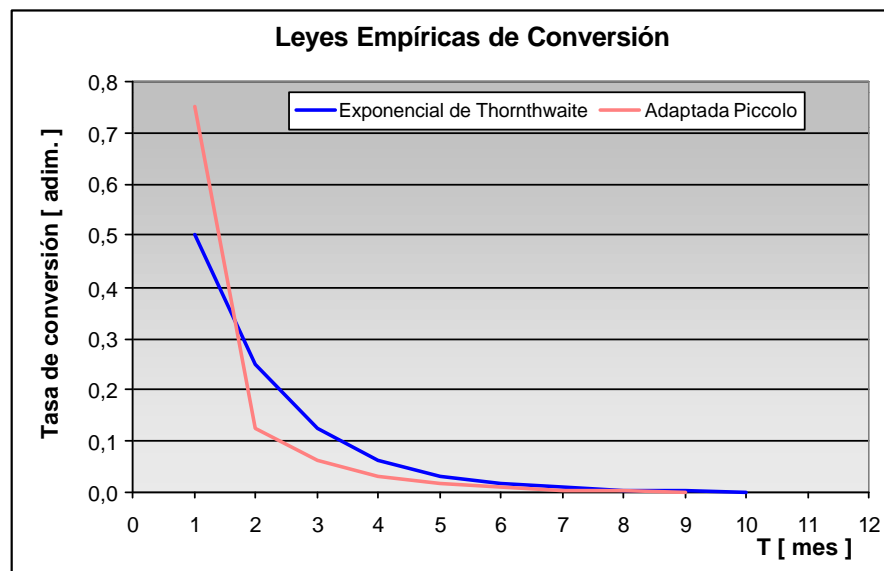


Figura 4: Leyes empíricas de conversión excesos-escorrentía

Las Figuras 5 a 9 muestran los aportes por tributario con su valor medio, deducidos desde un balance seriado y con la ley de conversión excesos-escorrentía exponencial propuesta por Thornthwaite.

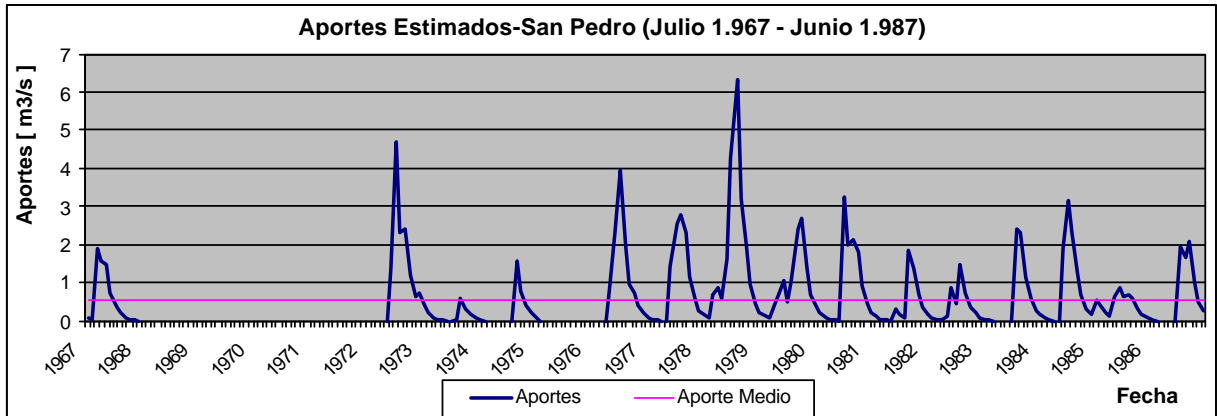


Figura 5: Aportes Estimados de la cuenca del Río San Pedro

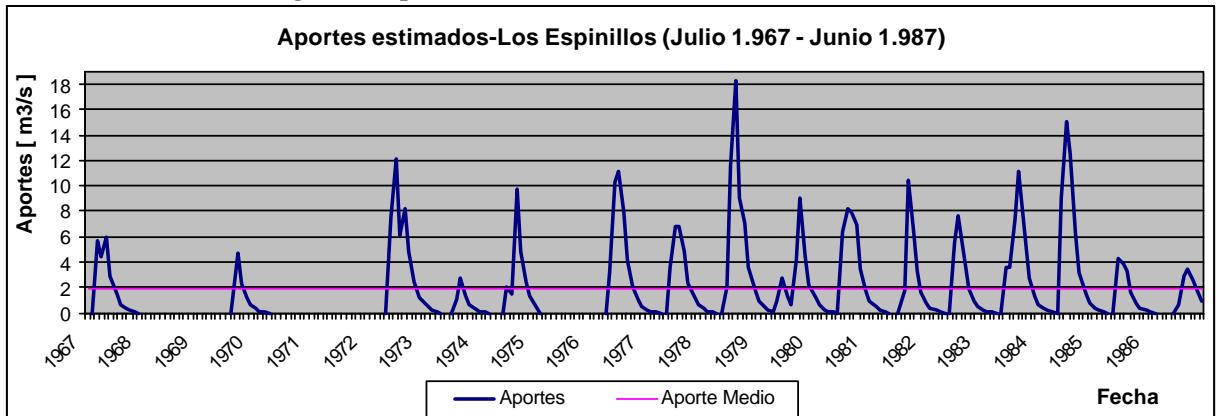


Figura 6: Aportes Estimados de la cuenca del Río de los Espinillos.

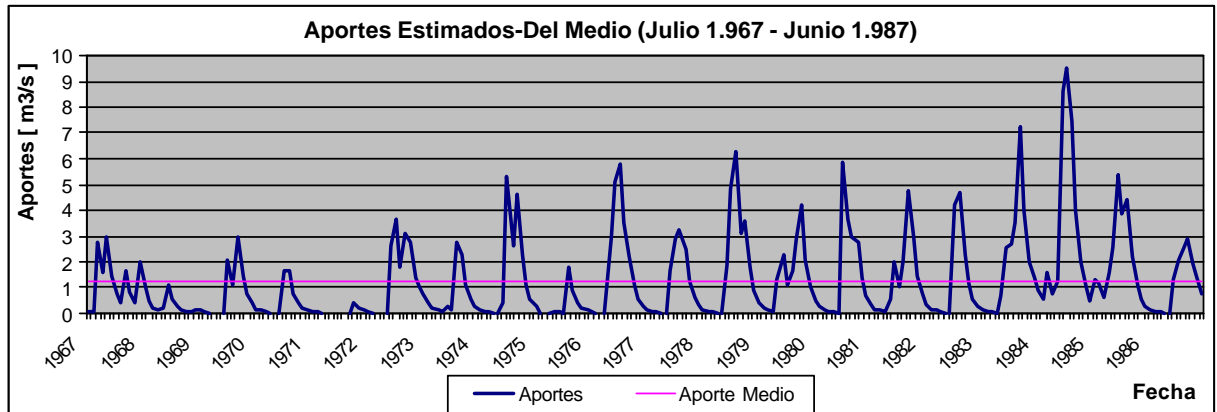


Figura 7: Aportes Estimados de la cuenca del Río del Medio .

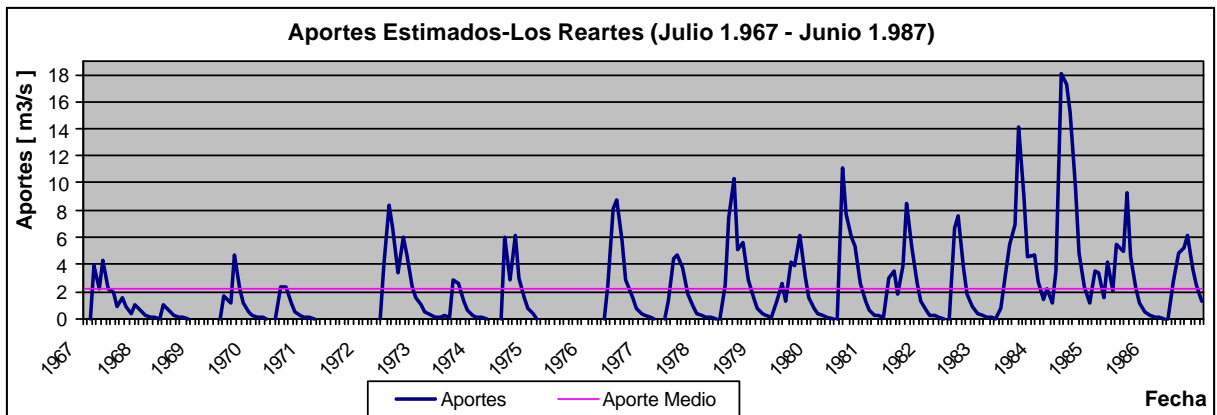


Figura 8: Aportes Estimados de la cuenca del Río de los Reartes.

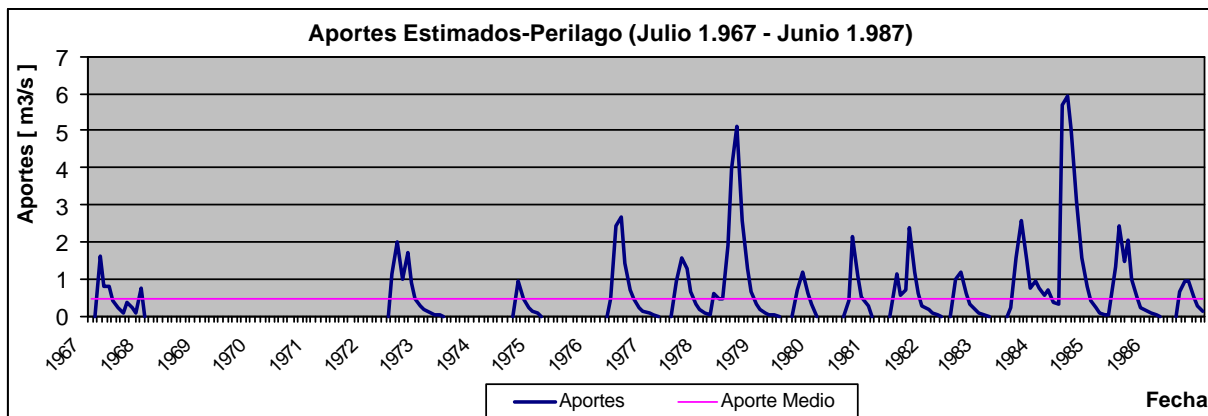


Figura 9: Aportes Estimados de la cuenca del Perilago.

En la Tabla 4 se sintetizan los aportes medios estimados de cada tributario al embalse, a partir de un balance seriado utilizando las dos leyes de conversión excesos-esorrentías propuestas.

Tabla 4: Aportes Medios Estimados al Embalse Los Molinos por cuenca

Cuenca	Aportes Medios [m ³ /s] según Balance Seriado	
	Período enero 1981 a junio 1987 – Ley de conversión excesos-esorrentía exponencial de Thornthwaite.	Período enero 1981 a junio 1987 – Ley de conversión excesos-esorrentía adaptada por Piccolo.
San Pedro	0,64	0,64
Los Espinillos	2,55	2,51
Del Medio	1,93	1,91
Los Reartes	3,76	3,71
Perilago	0,72	0,79
Los Molinos	9,66	9,56

Función Altura-Area (h-A) y Altura-Volumen (h-V)

En función de los niveles del embalse diario recopilados se calcularon las áreas del embalse y los volúmenes diarios utilizando la función Cota-Volumen (h-V) y Cota-Área (h-A) respectivamente, tabuladas por la Di.P.A.S. y aproximadas con funciones analíticas. El volumen medio mensual y la variación de volúmenes mensual se calculó por diferencia entre dos meses consecutivos y las áreas medias mensuales cubiertas por el embalse.

Caudales erogados

La serie recopilada comienza el 1 de enero de 1983, y continúa hasta la actualidad. Consiste en una única medición indirecta del caudal diario por medio de ábacos de caudal-altura-rendimiento, a partir de la potencia generada. Esta medición aunque no es representativa de la variación de caudales erogados de acuerdo a la demanda de energía eléctrica variable en el día, es la única que se posee, razón por la cual se la considera como la media diaria. El relleno de datos faltantes resulta de un promedio de las mismas fechas para los otros años en que fue medida la variable. Cabe agregar que, al usarse un paso de tiempo mensual, estos rellenos diarios son de escasa relevancia a nivel mensual. La serie final obtenida (Figura 10) comprende hasta el 27 de agosto de 2002, con una media de 11,89 m³/s (1,028 Hm³ diario o 30,83 Hm³ mensuales).

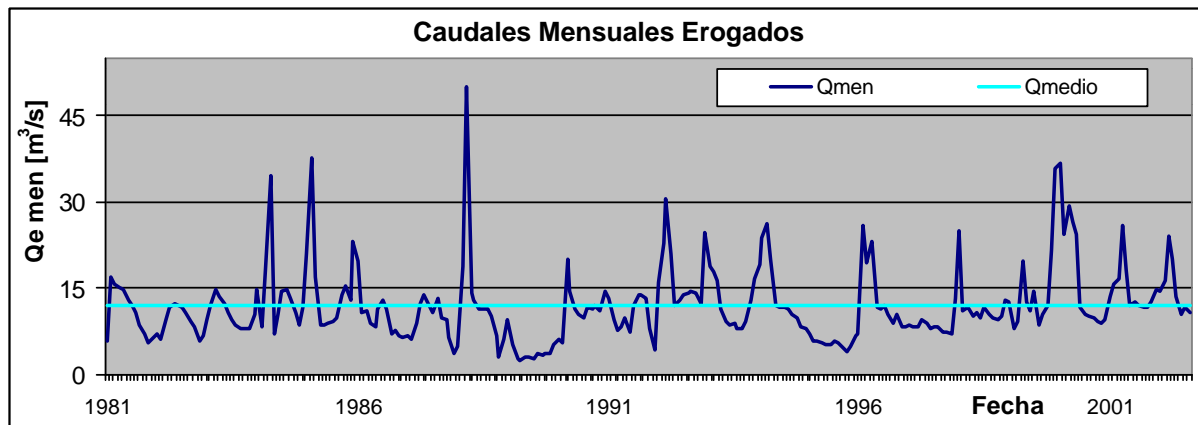


Figura 10: Caudales erogados medios mensuales del Embalse Los Molinos

PLANTEO DEL MODELO DE BALANCE

La ecuación planteada para el embalse fue derivada de la expresión general del balance hídrico para cualquier masa de agua e intervalo de tiempo (Sokolov,1981) la cual, eliminándole los términos no intervinientes puede adaptarse a lagos y embalses. En lagos y embalses donde existen variaciones importantes de la superficie del espejo de agua, por las variaciones y fluctuaciones de su nivel de agua, es conveniente expresarla en términos volumétricos.

Para el caso particular del Embalse Los Molinos, se planteó en términos de variación de volúmenes de agua (ΔV), dado entre los volúmenes aportados y los volúmenes evacuados y para un paso de tiempo mensual. La expresión presenta, tanto para el balance medio concentrado de las variables, como para el balance secuencial o seriado, la siguiente forma:

$$\Delta V_{LM} = Q_a + P_{LM} - E_{LM} - Q_d \quad (1)$$

donde:

- ΔV : Variación del volumen de agua del embalse.
- P_{LM} : Precipitación sobre la superficie del embalse Los Molinos.
- E_{LM} : Evaporación desde la superficie del embalse Los Molinos.
- Q_d : Caudal erogado del embalse.
- Q_a : Caudal aportado al embalse por todos los tributarios.

y a su vez:

$$Q_a = Q_{SP} + Q_{LE} + Q_{DM} + Q_{LR} + Q_{PL} \quad (2)$$

que representa el caudal aportado al embalse por:

- Q_{SP} : Caudal aportado al embalse por el Río San Pedro.
- Q_{LE} : Caudal aportado al embalse por el Río de los Espinillos..
- Q_{DM} : Caudal aportado al embalse por el Río del Medio.
- Q_{LR} : Caudal aportado al embalse por el Río de los Reartes.
- Q_{PL} : Caudal aportado al embalse por el Perilago.

VARIABLES DEL MODELO

Las variables que participan en este modelo son por su naturaleza, cinco, pero por su discretización en el espacio nueve, ya que los aportes entrantes corresponden a cada tributario. Los términos de entrada de agua al sistema (términos positivos) están dados por los aportes (Q_a) de cada tributario (5 cinco) y la lluvia precipitada sobre el lago (P_{LM}), mientras que las salidas por la evaporación (E_{LM}) y los caudales erogados (Q_d). La variable de control es la variación de volúmenes (ΔV)

Aportes por tributarios (Q_a)

Los aportes de los tributarios fueron estimados para una serie de 20 años en las cuencas (Figuras 6 a 10) a partir de los excesos hídricos dados por un balance en cuenca y convertidos a escurrimientos por las dos leyes mencionadas anteriormente. De esa serie se tomó el último período en correspondencia con los seis años y medio analizados para el balance del lago.

Precipitación sobre el embalse (P_{LM})

La precipitación sobre el embalse se obtuvo con la misma configuración de Thiessen utilizada para los aportes por cuenca, teniendo en cuenta la variabilidad diaria del espejo de agua de acuerdo a la cota del embalse.

Evaporación desde el embalse (E_{LM})

Para el cálculo de la evaporación desde el embalse, en este estudio se utilizó una expresión semiempírica basada en la diferencia psicrométrica (Da Porta y Caamaño Nelli, 1993). Esta expresión predictora fue desarrollada en base a estudios y mediciones realizados en 23 estaciones meteorológicas de todo el país. Esta ecuación fue calibrada en el embalse San Roque, Provincia de Córdoba (Taravella, R.; 2002) con condiciones climáticas reinantes similares al Embalse Los Molinos. La expresión calibrada para el Embalse San Roque es:

$$E = 367381,2 \cdot d^{0,23167} \cdot e^{[0,06086 \cdot (t-13,1143)]} \quad (10)$$

donde:

d : es la diferencia psicrométrica en °C. ($d = t_{bs} - t_{bh}$).
 t : temperatura media en °C.

y siendo el valor numérico 367381,2 el coeficiente de transferencia de vapor fijo o variable de acuerdo al cuerpo de agua, y los restantes a los coeficientes ajustados localmente.

Con la expresión y los datos de temperaturas mensuales (t) y la serie de temperaturas de bulbo húmedo mensuales se obtuvo la diferencia psicrométrica (d), y con ello la evaporación mensual desde el espejo de agua. En la Figura 11 se muestra la evolución temporal de esta variable.

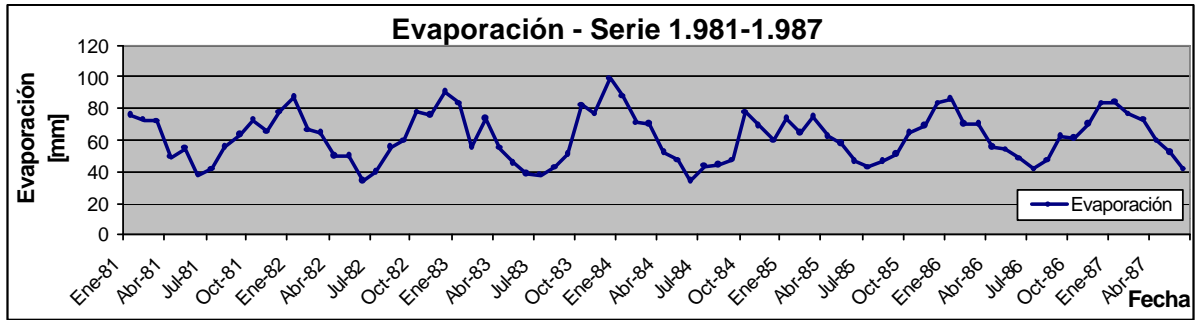


Figura 11: Evaporación del Embalse Los Molinos

Para obtener la evaporación cubicada desde la superficie libre de agua, se multiplicó por el área del embalse y luego llevada a la unidad usada en el balance [Hm^3], teniendo presente que el área es variable día a día de acuerdo a la cota del embalse.

Caudales erogados por el embalse (Q_d)

De la serie procesada se utilizó el intervalo del período de balance. En la Figura 12 se observa la serie con paso de tiempo mensual y su valor medio mensual que es de $29,95 \text{ Hm}^3$ ($11,4 \text{ m}^3/\text{s}$) para el período estudiado.

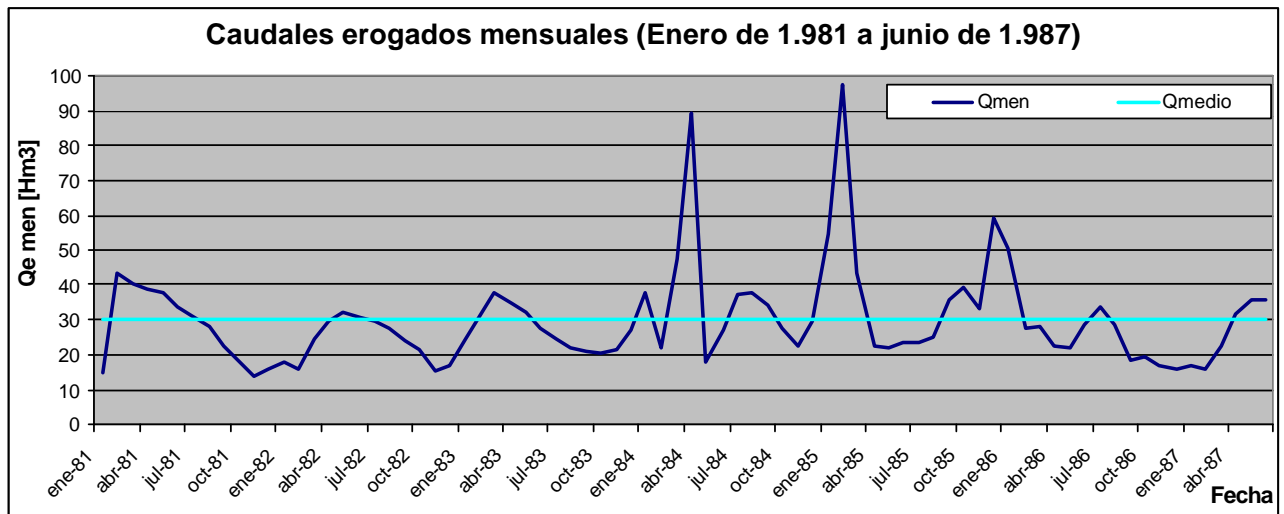


Figura 12: Caudales erogados mensuales y medio mensual en Hm^3

Variaciones de Volúmenes (DV)

Como el modelo fue planteado en términos de variación de volúmenes de agua (DV), se estimaron de la ecuación de balance para su posterior contraste con la serie medida.

MODELACIÓN DEL BALANCE EN EL LAGO

La modelación del balance se realizó de dos formas diferentes: una, utilizando los valores medios de los componentes (balance medio) para tener una primera aproximación de los resultados y otra teniendo presente la secuencia temporal de las variables intervinientes (balance seriado).

Balance Medio Mensual

Para el balance medio se usaron dos alternativas de cálculo: una teniendo en cuenta la variación mensual de tipo lineal de la reserva útil, y otra de tipo exponencial (Piccolo, 2003). Se tomó como aporte desde la cuenca la serie de deducida con la ley de conversión exceso-escorrentía exponencial.

La Tabla 5 muestra los resultados de aplicar el balance medio mensual con la *ley lineal* de la variación de la reserva útil. En este balance la diferencia total de agua entre los *DV* modelados y los *DV* medidos es de 93,8 Hm³ en déficit, que expresado en equivalentes de embalses ($V_{\text{lleno}} = 399 \text{ Hm}^3$) es de 0,24 embalses cada 6,5 años o 0,036 embalses por año.

La Figura 13 muestra los resultados de la aplicación de este caso donde puede apreciarse la representación del fenómeno por parte del modelo, bastante bien en cuanto a su distribución a lo largo del año.

El balance medio mensual con la *ley exponencial* de la variación de la reserva útil representa el fenómeno mejor que en el caso anterior. En este caso la diferencia de agua entre los *DV* modelados y los *DV* medidos disminuye a un valor de 83,3 Hm³ en déficit, que expresado en equivalentes de embalses es de 0,21 embalses cada 6,5 años o 0,032 embalses por año. Al igual que en el caso anterior el coeficiente de determinación R^2 es superior a 0,86, por lo que existe un alto grado de correlación entre la serie modelada y la medida.

Tabla 5: Balance medio mensual del embalse con ley exponencial de VRU.

Balance Hidrológico Medio en Hm ³													
Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total Año
$Q_{\text{San Pedro}}$	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	1.6	3.1	4.2	4.1	2.0	1.0	0.5	17.0
$Q_{\text{Espinillos}}$	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	5.2	15.7	15.6	13.2	6.6	3.3	1.6	62.7
Q_{Medio}	0.6	0.3	0.2	0.1	2.4	8.7	11.8	10.8	9.3	5.1	2.6	1.3	53.0
Q_{Reartes}	1.4	0.7	0.3	0.2	6.4	16.6	23.0	21.8	19.1	11.0	5.5	2.8	108.7
Q_{Perilago}	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	4.0	4.7	4.7	3.9	1.9	1.0	0.5	16.7
Q_a	3.3	1.7	0.8	0.4	8.8	36.0	58.4	57.0	49.4	26.7	13.3	6.7	262.6
P_{Lago}	0.7	0.3	0.6	1.0	1.7	3.6	3.0	2.9	2.4	1.1	0.4	0.2	18.0
EV_{Lago}	0.7	0.8	0.9	1.1	1.0	1.3	1.4	1.3	1.4	1.1	1.0	0.7	12.7
Q_d	29.4	28.3	27.5	25.4	21.3	29.8	27.8	37.6	36.2	41.2	29.8	29.7	364.0
$D V_{\text{modelado}}$	-26.0	-27.2	-26.9	-25.1	-11.8	8.5	32.2	21.0	14.3	-14.5	-17.0	-23.5	-96.0
$D V_{\text{medido}}$	-20.2	-19.6	-17.3	-15.4	-10.4	21.6	23.3	44.8	19.8	1.5	-12.8	-17.4	-2.2
$D (D V)$	-5.8	-7.5	-9.6	-9.6	-1.4	-13.0	8.9	-23.9	-5.5	-16.0	-4.3	-6.1	-93.8

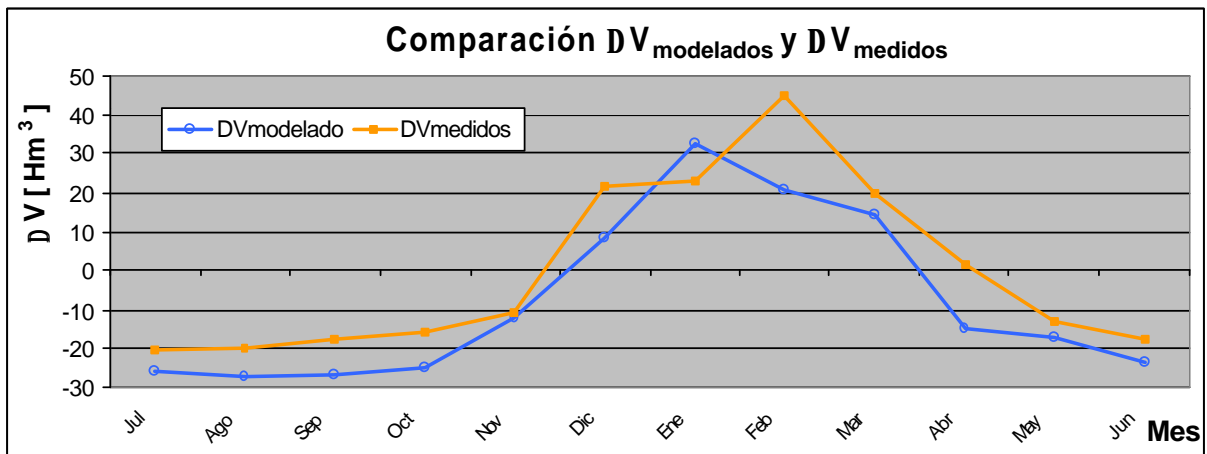


Figura 13: Comparación entre los DV modelados y los DV medidos, con ley lineal de VRU.

La Tabla 6 y la Figura 14 muestran los resultados del cálculo y la simulación de este caso.

Tabla 6: Balance medio mensual del embalse con ley exponencial de VRU.

Año Hidrológico Medio en Hm ³													
Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total Año
$Q_{San Pedro}$	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	2.2	3.5	4.3	4.2	2.1	1.0	0.5	18.3
$Q_{Espinillos}$	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	8.3	17.3	16.4	13.5	6.8	3.4	1.7	69.0
Q_{Medio}	0.6	0.3	0.2	0.1	2.9	9.0	12.0	10.9	9.3	5.1	2.6	1.3	54.2
$Q_{Reartes}$	1.4	0.7	0.3	0.4	6.8	16.8	23.1	21.9	19.1	11.0	5.5	2.8	109.8
$Q_{Perilago}$	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	4.2	4.8	4.7	3.9	2.0	1.0	0.5	16.9
Q_a	3.5	1.7	0.9	0.7	9.9	40.6	60.6	58.1	50.0	27.0	13.5	6.8	273.1
P_{Lago}	0.7	0.3	0.6	1.0	1.7	3.6	3.0	2.9	2.4	1.1	0.4	0.2	18.0
EV_{Lago}	0.7	0.8	0.9	1.1	1.0	1.3	1.4	1.3	1.4	1.1	1.0	0.7	12.7
Q_d	29.4	28.3	27.5	25.4	21.3	29.8	27.8	37.6	36.2	41.2	29.8	29.7	364.0
DV_m	-25.9	-27.1	-26.9	-24.8	-10.7	13.1	34.5	22.1	14.9	-14.2	-16.9	-23.5	-85.5
DV	-20.2	-19.6	-17.3	-15.4	-10.4	21.6	23.3	44.8	19.8	1.5	-12.8	-17.4	-2.2
$D(DV)$	-5.7	-7.5	-9.6	-9.4	-0.4	-8.5	11.1	-22.7	-4.9	-15.7	-4.1	-6.0	-83.3

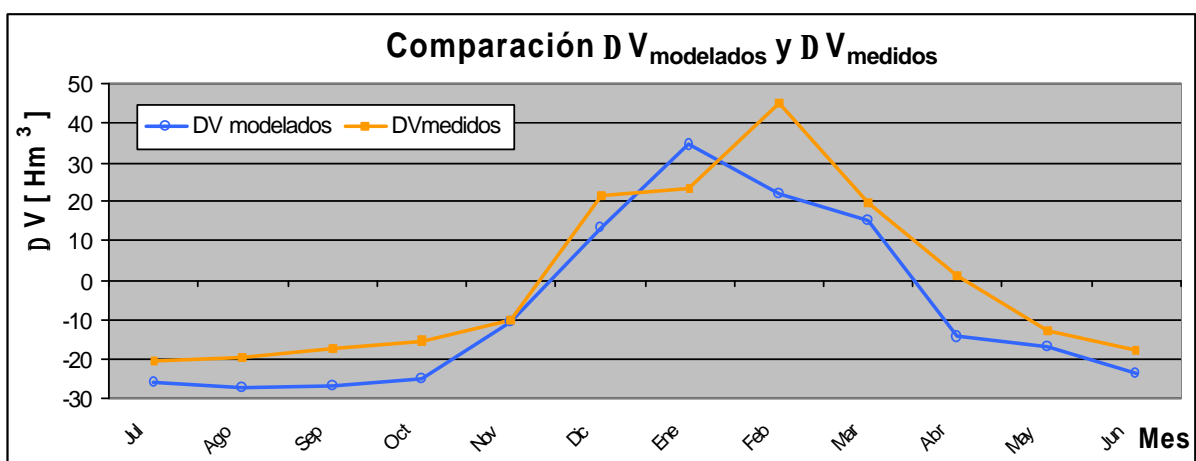


Figura 14: Comparación entre los DV modelados y los DV medidos, con ley exponencial de VRU.

Balance Seriado o Secuencial

En la Tabla 7, se presentan las distintas alternativas analizadas para el balance seriado, luego del planteo de distintas hipótesis, que se verificaron en sucesivas aproximaciones.

Tabla 7: Alternativas de aproximaciones de balance seriado o secuencial del embalse

Aproximación	Descripción	Ley de conversión Excesos-Escurrecimiento
A	Valores estimados o calculados de las variables participantes sin corrección alguna.	1- Exponencial (Thornthwaite)
		2- Adaptada (Piccolo)
B	Idem alternativa A, pero cambiando los valores de caudales erogados menores a cero por el mínimo (14 Hm ³ mensuales).	1- Exponencial
		2- Adaptada
C	Idem alternativa A, pero cambiando los valores de caudales erogados menores al mínimo por el mínimo (14 Hm ³ mensuales).	1- Exponencial
		2- Adaptada

El método de cálculo de la variación de reserva útil para todos los casos fue la lineal. Como surge de la tabla las alternativas A-1, B-1 y C-1 corresponden a aportes desde los tributarios calculados con la ley de conversión exponencial de excesos en escurrimientos.

La modelación de la primera Alternativa (A-1) consistió en aplicar la ecuación de balance con los valores estimados o medidos de las variables que participan en el término de la derecha y estimando las variaciones de volúmenes (DV). El término Q_a está dado por los excesos de las subcuencas de aporte estimados con la ley de variación de reserva útil lineal y para una capacidad de reserva máxima del suelo de 138 mm, aportados al embalse siguiendo la *ley de distribución de excesos exponencial*. Aplicada la ecuación de balance, se comparan los valores de DV modelados con los obtenidos por transformación en volúmenes de la medición de cotas del embalse. Generalmente los resultados no concuerdan en su totalidad, pero deben ser próximos, caso contrario deberá revisarse el modelo con sus hipótesis, los valores de las variables estimadas y hasta las variables medidas que ingresen en la ecuación predictora.

En esta primera aproximación se obtuvo una diferencia de 500,1 Hm³ de agua, en déficit, lo cual significa que sale más agua de la cuenca que la que entra. Esta diferencia es sumamente alta, ya que el volumen a cota máxima es de 399 Hm³, lo que indicaría que falta en agua un equivalente en embalses de 1,25 embalse en esos 6,5 años o sea a razón de 0,19 embalse por año. Además de esta diferencia, al analizar mes a mes, el comportamiento de las curvas de los ΔV modelados y medidos, se vio que la curva modelada presenta una tendencia general a permanecer debajo de la curva medida, comportamiento lógico, ya que en el balance se obtuvo un ΔV_{final} en déficit (500,1 Hm³). Pero por otra parte, las curvas siguen ondas similares y se acompañan tanto en los senos como en los valles estacionales, lo que permite concluir que el error está dado por el volumen estimado de agua y no por su distribución temporal.

En la Figura 15 se observa la representación gráfica de ambas series, $DV_{\text{modelados}}$ y DV_{medidos} para esta hipótesis inicial.

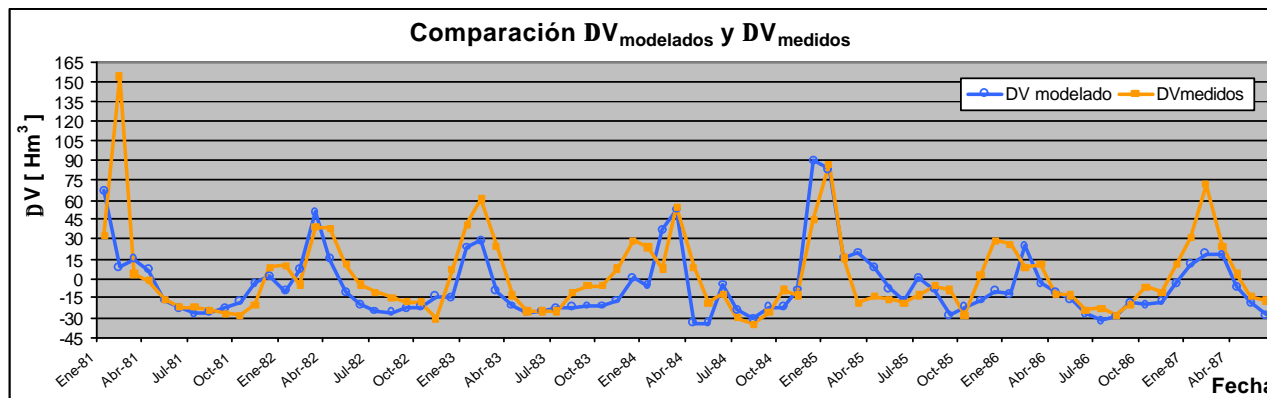


Figura 15: Alternativa A-1 - Comparación entre DV modelados y medidos.

En la segunda aproximación de balance (Alternativa B-1) se tiende a corregir los valores inconsistentes, para ello se despejó a la variable Q_d como variable de control de la mencionada ecuación de balance, a fin de observar el comportamiento de los caudales erogados resultantes. Los resultados demostraron la presencia de valores modelados inconsistentes con la física del proceso, es decir valores de Q_d negativos. Ante esa incongruencia, se adopta una nueva suposición que consistió en cambiar los valores de Q_d modelados negativos o iguales a cero por otro valor mínimo adoptado.

Este valor mínimo surge de la suma de caudales que extrae el canal Los Molinos-Bower y el caudal ecológico del río, o lo que es lo mismo que el caudal turbinado por la central hidroeléctrica Los Molinos II, que es el descargado al río aguas arriba del azud nivelador La Quintana. Ya que esta planta está turbinando constantemente, por generar energía de base, y al no tener el azud La Quintana (lugar de nacimiento del canal) un vaso con gran capacidad de almacenamiento, se pueden considerar iguales ambos caudales. El valor mínimo estimado medio mensual es de $14,256 \text{ Hm}^3$ ($5,5 \text{ m}^3/\text{s}$) que coincide con el mínimo medido por la empresa de energía (E.P.E.C) que es de 14 Hm^3 , que finalmente es el valor adoptado para los ajustes.

Una vez que se cambiaron los valores negativos por el mínimo fijado (14 Hm^3), se corrigió el valor de caudal aportado por los tributarios, incluido el perillago, ya que se debe mantener el principio de conservación de la masa. Sólo se corrigieron los caudales aportados por ser los principales ingresos de agua al embalse y una de las fuentes más importante de error, por proceder de balances de subcuencas con todas sus estimaciones, suposiciones y errores acumulados. Esto se hizo en el balance planteado con la variable Q_d como variable de control. De la misma ecuación del balance se despeja el caudal que debería de aportar la cuenca (Q_a) para que el embalse erogue ese valor mínimo aceptado de 14 Hm^3 . Posteriormente, para ser congruente se corrige por tributario con una relación lineal entre los caudales que transportaba antes ese tributario, el total aportado en el mes por todos los tributarios y el nuevo caudal total aportado con la siguiente expresión:

$$Q_{\text{tributario}}^{\text{corregido}} = \frac{Q_{\text{tributario}}^{\text{sin corregir}}}{Q_{\text{atotal}}^{\text{sin corregir}}} \cdot Q_{\text{atotal}}^{\text{corregido}} \quad (11)$$

Aplicada esta expresión a un caso concreto como el dado en la Tabla 8 (diciembre de 1982) da como resultado numérico, por ejemplo para el Río San Pedro, los siguientes valores:

Tabla 8: Corrección de los caudales aportados al embalse en función del caudal mínimo a erogar

Ejemplo	Diciembre de 1.982		
	Antes	Cálculo	Después
$Q_{San\ Pedro}$	2.2	19.3	19.3
$Q_{Espinillos}$	0.1	0.6	0.6
Q_{Medio}	0.0	0.2	0.2
$Q_{Reartes}$	0.1	0.4	0.4
$Q_{Perilago}$	0.0	0.1	0.1
Q_a	2.4	20.7	20.7
P_{Lago}	1.5	$Q_a + 14 - Q_{dm}$	1.5
EV_{Lago}	1.3	Cálculos	1.3
DV	6.9	$14 - Q_{dm}$	6.9
Q_{dm}	-4.3	18.3	14.0

$$Q_{aSanPedro}^{corregido} = \frac{Q_{aSanPedro}^{sin\ corregir}}{Q_{atotal}^{sin\ corregir}} \cdot Q_{atotal}^{corregido}$$

$$Q_{aSanPedro}^{corregido} = \frac{2,2Hm^3}{2,4Hm^3} \cdot 20,7Hm^3$$

$$Q_{aSanPedro}^{corregido} = 19,3Hm^3$$

Una vez corregidos los Q_a se realizó el balance de la forma convencional dejando a DV como variable a estimar y controlándola con el ΔV obtenido de la transformación cotas-volúmenes. Con esta segunda aproximación la diferencia final es de 235,7 Hm^3 de agua, también en déficit. La diferencia cae notoriamente con respecto a la primera aproximación (más de dos veces) que expresada en embalses es de 0,59 embalse en 6,5 años o 0,09 embalse por año y aplicando una regresión entre ambas (ΔV_{mod} y ΔV_{med}) el grado de correlación es aceptable, con un R^2 de 0,76. Aunque disminuyó la cantidad de agua faltante y las curvas continúan siendo similares y están en fase, todavía es demasiada agua la que falta en este breve período de tiempo, como se puede apreciar en la Figura 16.

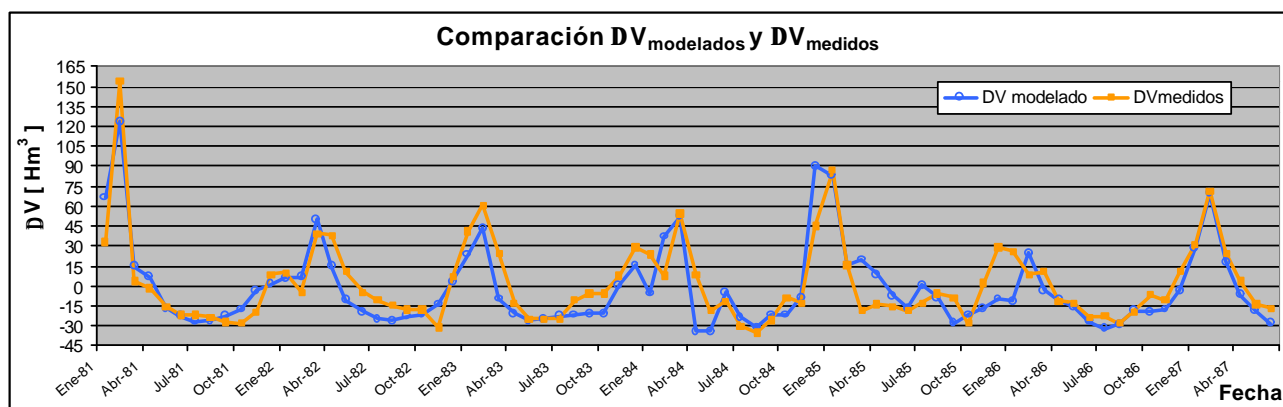


Figura 16: Alternativa B-1 - Comparación entre DV modelados y medidos

Por último, para la tercera aproximación (Alternativa C-1), la hipótesis utilizada es que todo caudal erogado menor al mínimo adoptado (14 Hm^3 por mes) sea reemplazado por este caudal erogado mínimo.

Para su puesta en práctica se siguió el procedimiento antes descrito, corrigiendo el caudal erogado menor al mínimo y luego operando de igual modo que en la aproximación anterior. Se despeja el valor de caudal aportado total que cumpla la ecuación del balance y se corrige los valores de caudales aportados por los tributarios en forma proporcional.

La diferencia final obtenida cae aún más, siendo de $153,5 \text{ Hm}^3$ de agua (Figura 17), también en déficit entre el DV modelado y el medido. Expresada en embalses es de 0,38 embalse en 6,5 años o sea a razón de 0,06 embalse por año.

Este valor ya puede considerarse aceptable, más aún cuando se aprecia una buena simulación de los valores medidos, quedando esto manifiesto con el alto coeficiente de determinación obtenido entre las dos curvas ($R^2 = 0,78$).

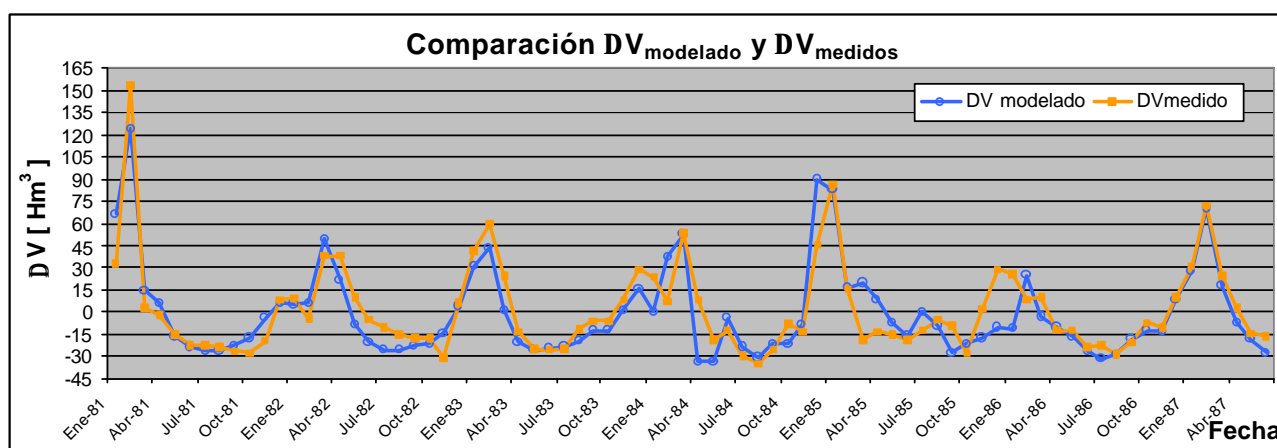


Figura 17: Alternativa C-1 - Comparación entre DV modelados y medidos

Una vez realizadas estas simulaciones, se experimentaron con las alternativas A-2, B-2 y C-2 siguiendo iguales suposiciones pero con caudales aportados provenientes de una ley de conversión excesos-escorrentía adaptada.

La primera, A-2, al igual que en la A-1, consistió en aplicar la ecuación de balance con los valores estimados de las variables que participan en el término de la derecha y estimando las variaciones de volúmenes (DV). El término Q_a , está dado por los excesos de las subcuencas aportados al embalse siguiendo la ley de distribución de excesos adaptada.

En esta nueva aproximación se obtuvo una diferencia de $495,2 \text{ Hm}^3$ de agua, en déficit. Esta diferencia expresada en equivalentes de embalses, es de 1,24 embalse en esos 6,5 años o sea a razón de 0,19 embalse por año. En esta alternativa también se ve un comportamiento similar, mes a mes, de las curvas de los ΔV modelados y medidos, acompañándose tanto en los mínimos como en los máximos estacionales.

En la Figura 18 se observa la representación gráfica de ambas series, $DV_{\text{modelados}}$ y DV_{medidos} para esta nueva alternativa.

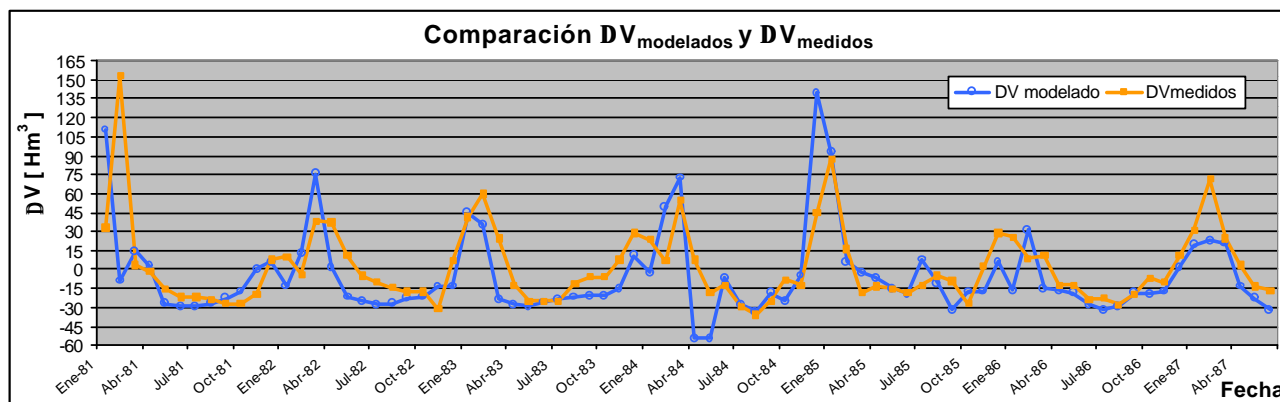


Figura 18: Alternativa A-2 - Comparación entre DV modelados y medidos.

En la segunda aproximación Alternativa B-2, se tiende a corregir los valores inconsistentes, de la misma forma que en la Alternativa B-1, adoptándose un caudal mínimo a erogar de 14 Hm^3 mensuales. Con esta aproximación la diferencia final es de $216,2 \text{ Hm}^3$ de agua, también en déficit. La diferencia cae en el orden de dos veces con respecto a la primera aproximación, que expresada en embalses es de 0,54 embalse en 6,5 años o 0,08 embalse por año. Pero todavía es demasiada agua la que falta en este breve período de tiempo, como se puede apreciar en la Figura 19.

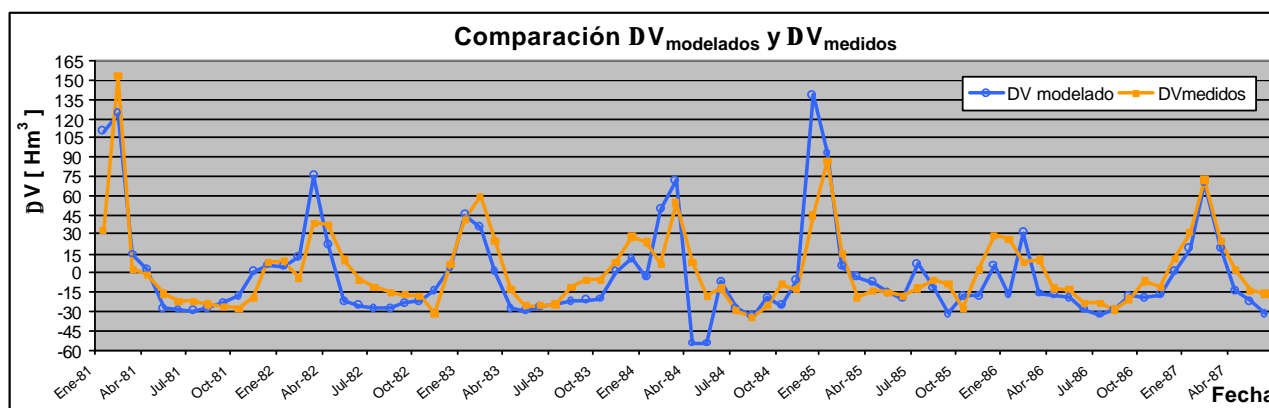


Figura 19: Alternativa B-2 - Comparación entre DV modelados y medidos

Por último, para la tercera aproximación (Alternativa C-2), la hipótesis utilizada es que todo caudal erogado menor al mínimo adoptado (14 Hm^3 por mes) sea reemplazado por este caudal mínimo. Para su puesta en práctica se siguió el procedimiento antes descrito.

La diferencia final obtenida siguió disminuyendo, siendo de $111,2 \text{ Hm}^3$, en déficit entre el DV modelado y el medido. Expresada en embalses es de 0,28 embalse en 6,5 años o sea a razón de 0,04 embalse por año.

Este valor ya puede considerarse aceptable, más aún cuando se aprecia una buena simulación de los valores medidos por parte de la curva modelada, como se aprecia en la Figura 20. Obteniéndose para esta alternativa un coeficiente de determinación $R^2 = 0,71$.

Cómo síntesis de este análisis puede decirse que tanto la alternativa C-1 como la C-2 son aceptables, al tener ambas un error de estimación del DV menor que 10 % del volumen del embalse por año. Aunque si nos centramos en las diferencias netas de DV obtenidas, la mejor aproximación es la calculada con la Alternativa C-2.

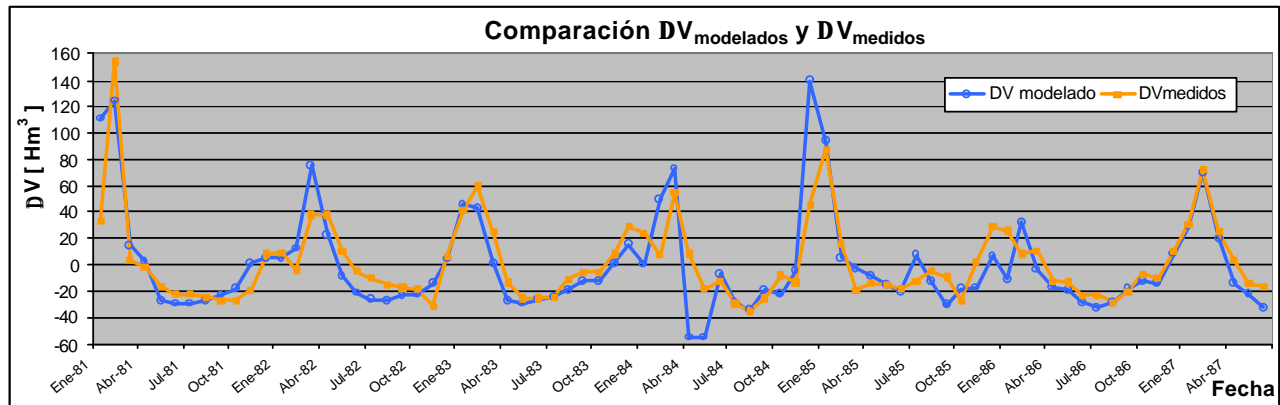


Figura 20: Alternativa C-2 - Comparación entre DV modelados y medidos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados estuvo orientado a comparar los resultados entre los **DV** modelados y los **DV** medidos, tanto en su grado aproximación con respecto al volumen final estimado por el balance, como en la simulación mes a mes, ya sea en el transcurso de un año hidrológico medio (balances medios) o a lo largo del período analizado (balances seriados).

Para el primer tipo de balance, en las dos alternativas de balances medios planteadas hubo déficit de agua. En el caso del balance medio con cálculo de la variación de reserva lineal la diferencia total de agua entre los **DV** modelados y los **DV** medidos es de $93,8 \text{ Hm}^3$ en déficit, mientras que el calculado con variación de reserva exponencial es de $83,3 \text{ Hm}^3$ en déficit, diferencia que expresada en términos de embalse lleno ($V_{\text{lleno}} = 399 \text{ Hm}^3$) y por año, es del orden de 0,03 embalses (12 Hm^3) por año.

Respecto a la simulación mes a mes se observa que a lo largo de un año hidrológico medio, se presenta un desfase durante el ciclo húmedo entre el pico de los **DV** modelados y los **DV** medidos, tanto temporalmente como en magnitud. El pico de la simulación se presenta en el mes de enero, cuando en la medición se da a fines de febrero. Durante el ciclo seco en cambio, entre los meses de mayo a octubre, ambas curvas son de similar forma, pero siempre la modelada subestimando la medida. Una correlación entre los valores simulados y los medidos a lo largo del año medio, presenta valores de R^2 superiores al 0,85 en ambas alternativas, indicando una aproximación aceptable de la modelación.

En cuanto a los balances seriados, para las alternativas A-1 y A-2 se obtuvo una diferencia de $500,1 \text{ Hm}^3$ y $495,2 \text{ Hm}^3$ respectivamente, en déficit, indicando que el método de conversión de excesos no incide de manera determinante sobre el volumen final estimado en la modelación. Sin embargo, estas diferencias son sumamente altas, ya que el volumen a cota máxima del embalse es de 399 Hm^3 , lo que indicaría que falta en agua un equivalente de más de un embalse lleno en un período de 6,5 años. Un aspecto importante de destacar, es que las curvas de modelación de **DV** acompañan, en ambas alternativas, tanto a los máximos como a los mínimos estacionales, lo que permite inferir que el error está dado por el volumen total de agua estimado y no por su distribución temporal. Esto se manifiesta en las diferencias de magnitud entre los picos de la series de **DV** modeladas y medida.

Las alternativas B-1 y B-2, que consistieron en cambiar los valores de Q_d modelados, negativos o iguales a cero, por el valor mínimo adoptado de 14 Hm^3 mensuales y corregir los

aportes estimados para cumplir esta condición mínima, se alcanzaron resultados más satisfactorios. Las diferencias en ambos casos caen notoriamente con respecto a la primera aproximación (más de dos veces), obteniéndose una diferencia acumulada de 235,7 Hm³ de agua, para el primer caso y de 216,2 Hm³ para el segundo ambas en déficit. La diferencia en los picos se atenúan con esta nueva hipótesis, pero la cantidad de agua faltante se considera todavía importante.

Por último, la decisión de cambiar por el caudal erogado mínimo, no sólo a los caudales menores o iguales a cero, sino también los menores a este valor fijado, (alternativas C-1 y C-2) las diferencias de volúmenes finales decaen aún más, siendo de 153,5 Hm³ y de 111,2 Hm³ respectivamente, siempre en déficit. Se observa una buena simulación de la serie, por lo que se consideran aceptables estos valores. La primera, presenta un déficit mayor que la segunda, pero fue mejor su aproximación de los valores simulados. La segunda, en cambio, tiene menor variación de *DV*, pero decae su grado de simulación.

CONCLUSIONES

La región donde está emplazado el Embalse Los Molinos presenta una importante falencia de mediciones hidrológicas e hidrometeorológicas, históricas y actuales, que condiciona la estructura de los modelos de balance a implementar. La ausencia de mediciones sistemáticas de caudales entrantes al embalse, obligó el empleo de distintas técnicas destinadas a determinar los escurrimientos a partir de los excesos hídricos en las cuencas.

La ley de transformación de excesos en escurrimientos superficiales, de tipo exponencial propuesta por Thornthwaite debe ser adaptada a las condiciones del medio físico local. A juzgar por los resultados finales en la modelación del embalse, la ley de transformación adaptada brinda mejores aproximaciones de volumen final acumulado.

Los balances medios fueron buenos indicadores del comportamiento hídrico en el embalse, sin embargo, los balances seriados lograron una mejor representación del proceso evolutivo de las reservas en el lago. El resultado final de volumen alcanzado, del orden de 0,05 embalses por año, es aceptable para el período de seis años y medio analizado.

Por último se puede decir que este primer intento de cuantificar las reservas hídricas brinda resultados que ayudan a explicar los fenómenos partícipes en el cálculo del balance y fijar lineamientos básicos para la planificación y el manejo del recurso en el Embalse de Los Molinos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambrosino, S. N.** (2000) *“Caracterización Geológica Y Geomorfológica De La Cuenca Embalse De Los Molinos, Córdoba”*. Trabajo Final De Geología. F.C.E.F.Y.N.-U.N.C. Córdoba, Argentina.
- Aparicio Mijares, F. J.** (1993). *“Fundamentos De Hidrología De Superficie”*. Editorial Limusa. México.
- Caamaño Nelli, G.; Dasso, C. M.** (1987) *“Estimación De La Humedad Del Suelo En Una Cuenca Semiárida Mediante Balance Hidrológico Diario”*. Primeras Jornadas Nacionales de Zonas Áridas y Semiáridas, Santiago del Estero, Argentina.
- Consejo Federal De Inversiones** (1977) *“Estudio Integral De Los Recursos Hídricos De La Cuenca Del Río Salí-Dulce. Balance”*. Capítulo de: *“Balance Hidrológico De La Cuenca Y Subcuencas Del Río Salí”*. Argentina.

- Consejo Federal De Inversiones; Franklin Consultora S.A.; Interconsul S.A.**-(1985)-*Estudio De Prefactibilidad De Esquemas Alternativos Para El Aprovechamiento De Los Volúmenes De Agua Excedentes Localizados En El Área Comprendida Entre Los Paralelos 36° Y 32° S. Y Los Meridianos 62° Y 65° O.*-. Argentina.
- Custodio, E.; Llamas, M.**-(1976)-*Hidrología Superficial*-. Ediciones Omega. España.
- Chow, V. T.; D. R. Maidment; L. W. Mays**-(1994)-*Hidrología Aplicada*-. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana S. A.. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Daporta, W.**-(1993)-*Física De La Evaporación Y Evapotranspiración Real Y Potencial, Aplicaciones Prácticas*-. I.N.C.YT.H.-CONICET-CHRSA. Córdoba, Argentina.
- Daporta, W.; Caamaño Nelli, G.**-(1993)-*Psicrómetro Y Evaporación*-. I.N.C.yT.H.-Cirsha-CONICET. Argentina.
- Dasso, C. M.; García Rodríguez, C. M.**-(1996)-*Tratamiento De Datos De Precipitación*-. VI Curso de Capacitación Técnica en Mediciones Hidrológicas y Tratamiento de Datos. CHRSA I.N.C.yT.H. Va. Carlos Paz, Argentina.
- Dirección Provincial De Hidráulica;** 1981.-*Presas De La Provincia De Córdoba*-. Córdoba, Argentina.
- Drago, E.; Depetris, P.**-(1975)-*Sedimentación En El Embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina*-. Physis, Vol. 34, Nº 89: Pp. 175-178. Buenos Aires, Argentina.
- Fernández García, F.**-(1996)-*Manual De Climatología Aplicada, Clima, Medio Ambiente Y Planificación*-. Editorial Síntesis S.A., España, 1996.
- Hirsch, R.; Slack, J.; Smith, R.**-(1982)-*Techniques Of Trend Analysis For Monthly Water Quality Data*-. U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. WRR, Vol. 18, No 1, Pages 107-121. U.S.A..
- Instituto Nacional De Ciencia Y Técnica Hídricas; Programa Hidrológico Nacional**-(1994)-*Balance Hídrico De La República Argentina*-. Buenos Aires, Argentina.
- I.N.T.A.; M.A.G.YR.R.; I.FO.NA.** (1988)-*Mapa De Suelos, Hoja 3366-6 Santa Rosa De Calamuchita*. Convenio I.FO.NA.-M.A.G.YR.R. Córdoba, Argentina.
- Llamas, J.**-(1989)-*Hidrología General. Principios Y Aplicaciones*-. Universidad Autónoma De México. D.F., México
- Maldonado, C. A.**-(1995)-*Los Molinos, Complejo Hidroeléctrico*-. Aleión Editora. Argentina.
- Ministerio de Obras Públicas de la Nación, Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA)**-(1997)-*Estadística Hidrológica 1997*-. Tomo II, Buenos Aires, Argentina.
- Monsalve Sáenz, G.**-(1999)-*Hidrología En La Ingeniería*-. Editorial Alfaomega. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Moya, G. G.**-(2000)-*Análisis De Disponibilidades De Los Recursos Hídricos Superficiales Del Área Del Gran Córdoba*-. Trabajo Final De Grado. F.C.E.F.yN.-U.N.C. Córdoba, Argentina.
- Orsolini, H.; E.Zimmermann; P. Basile.**-(2000)-*Hidrología. Procesos Y Métodos*-. Unr Editora. Rosario, Argentina.
- Piccolo, J.**-(2003)-*Balance Hídrico Superficial en la Cuenca y el Embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina*-. Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Civil de la F.C.E.F.yN.-U.N.C. Córdoba, Argentina.
- Sheriff, F.**-(1988)-*Introducción A La Climatología General*-. Curso Internacional Sobre Recursos Hídricos, U.A.E.M., Facultad De Ingeniería, Toluca, México.
- Sokolov, A. A. Y Chapman, T. G.**-(1981)-*Métodos De Cálculo Del Balance Hídrico - Guía Internacional De Investigación Y Métodos*-. Editada Por Uneseo/. Instituto de Hidrología de España. Madrid, España.
- Storani, B.**-(1996)-*Tratamiento De Datos Meteorológicos*-. VI Curso de Capacitación Técnica en Mediciones Hidrológicas y Tratamiento de Datos. CHRSA-INCyTH. Va. Carlos Paz, Argentina.
- UNESCO- ROSTLAC.**-(1982)-*Guía Metodológica Para La Elaboración Del Balance Hídrico De América Del Sur*..

~~Edit. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco Para América Latina y El Caribe. Montevideo, Uruguay.~~

Vázquez, J. B.; Miatello, R. A.; Roqué, M. E. (1979) "*Geografía Física De La Provincia De Córdoba*". Editorial **Boldt**, Argentina.

Vargas, W. M.; Levinsky, A. E. (1976) "*Método De Análisis De Las Condiciones Hídricas Mediante Las Técnicas De Balance*". I.N.C.yT.H. Buenos Aires, Argentina.

Wiesner, C. J. (1970) "*Hydrometeorolgy*". Chapman And Hall Ltd. Australia.

Winter, T.W. (1981) "*Uncertainties In Estimating The Water Balances Of Lakes*". ~~Water Resources Bulletin, American Water Resources Association. Vol 17, N° 1. U.S.A.~~