

MODELO DE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE UN SISTEMA LAGUNAR, CASO “LAGUNA NEGRA”, PROVINCIA DEL CHUBUT

Juan J. Serra y María J. Chachero

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
Av. 9 de Julio 25, Trelew, Chubut, Argentina – Tel/Fax +54 (0) 2965-428403
e_mail: juanjoseserra@hotmail.com – www.dich.edu.ar

RESUMEN

En muchos problemas de ordenamiento territorial, evaluación de riesgo hidrológico, o de intervención con obras hidráulicas en urbanizaciones de la Patagonia, se interactúa con depresiones y cadenas de lagunas que son características morfológicas del paisaje de meseta, del valle de sus ríos y su zona de contacto. La escasez de datos hidrométricos para el estudio de casos suele ser una dificultad común, particularmente por el carácter temporario de los cursos de agua y bajos inundables. Con foco en esta tipología de paisaje y problemática, se diseñó un modelo de balance de masa hídrica en un sistema de lagunas, que permitió disponer de una metodología simplificada para la evaluación y análisis hidrológico de estos casos. Entre otras aplicaciones regionales, el modelo desarrollado se utilizó como herramienta de análisis en el “Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew”, cuyos efluentes se vierten al área de lagunas existente entre esta ciudad y Rawson, en la Provincia del Chubut. Se resumen los principales resultados y conclusiones de la simulación hidrológica lograda.

Palabras clave: Hidrología superficial, lagunas, mesetas, efluentes, VIRCh, Río Chubut.

ABSTRACT

In many problems of land use planning, hydrological risk assessment, or intervention with hydraulic works in the urban development of Patagonia, depressions and chain of lagoons are present, they are morphological characteristic of the plateau landscape, or the rivers valley and the contact zone. The lack of hydrometric data for the study of cases is usually a common difficulty, particularly by the temporary watercourses and lagoons. A hydrological model was designed for calculation the surface-water mass balance in the lagoon system, studying with focus in this type of landscape and problems. The study permitted a simplified methodology for the assessment and hydrological analysis of these cases. Among other uses regional, the model was developed as an analytical tool in the management plan of the wastewater treatment system in the Trelew city, in the province of Chubut, Argentina. The wastewater of Trelew are discharged into the existing lagoons between the city and Rawson city. Summarizes the main findings and conclusions of hydrologic simulation.

Keywords: Surface hydrology, lakes, plateaus, effluent, VIRCh, Chubut River.

INTRODUCCIÓN

En las mesetas, y en las zonas de contacto meseta-valle, se presentan conformaciones geomorfológicas cuyas características hidrológicas las distinguen de los paisajes extremos de montaña y de llanura. Son sistemas hidrológicos mixtos (SHM), en los cuales, los subsistemas lagunares encadenados (SLE) (Serra, 2006) constituyen una particularidad muy común (Figura 1).

Muchos problemas de ordenamiento territorial e inundaciones urbanas (Bertoni, 2006) en la Patagonia, están condicionados por morfologías de extensos relieves mesetiformes, en régimen climático áridos a semiárido. Calver y Anderson (2004) expresan que las principales características geomorfológicas resultan de inundaciones de gran magnitud, con rasgos que persisten en el paisaje.

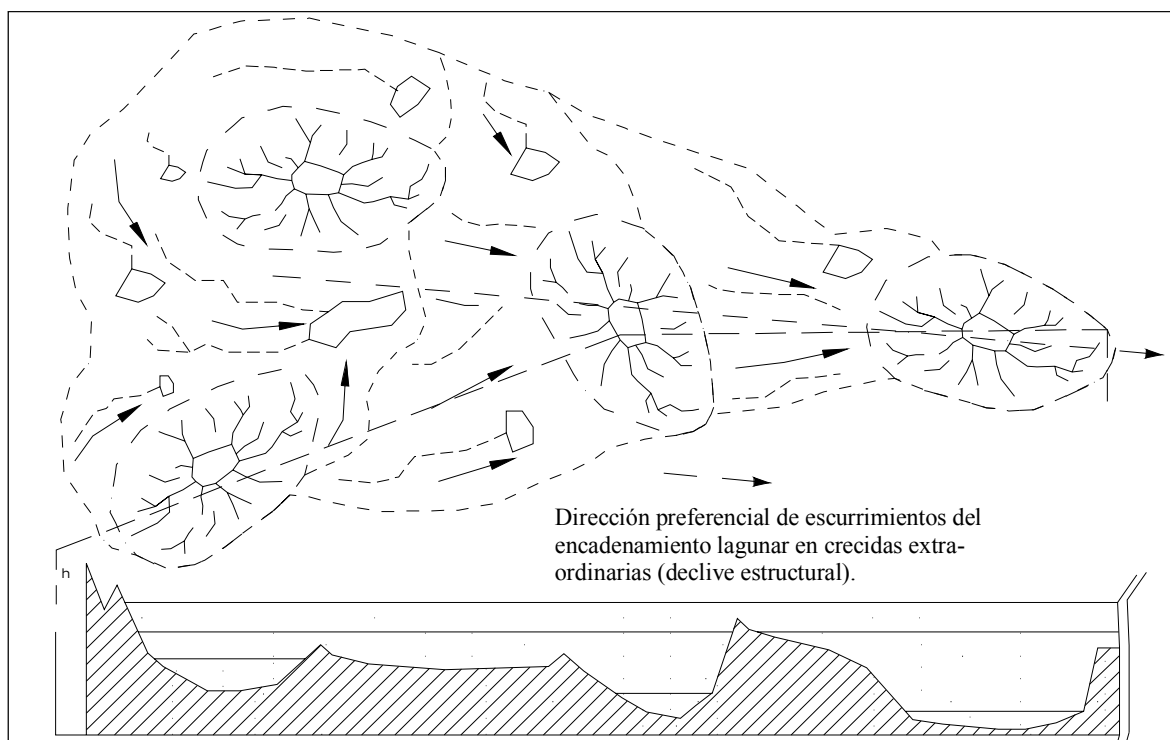


Figura 1. Esquema de Sistema Hidrológico Mixto (SHM), Subsistema Lagunar Encadenado (SLE). Fases hidrológicas para períodos secos, húmedos e hiperhúmedos.

En el abordaje de estos problemas hídricos en SLE, sean de planificación, estudios de caso, o de ingeniería en la intervención con obras hidráulicas, suele requerirse conocer escenarios de variación de niveles, superficies de inundación, y almacenamiento de aguas de los cuerpos lagunares.

La escasez de registros limnimétricos y aforos, que particularmente se agrava en ambientes con cursos y espejos de agua temporarios, suma una condición a tener presente en el análisis a realizar. Esto dificulta el pronóstico de situaciones mediante el análisis con datos precedentes.

El análisis prospectivo de situaciones que puedan evolucionar en torno de ambientes lagunares, con o sin intervención antrópica, es posible apoyarlo con

métodos hipotéticos-deductivos. Las técnicas de modelación, y la disponibilidad de otra información física del ambiente de trabajo, permiten explorar métodos predictivos con aproximaciones en grado suficiente para apoyar la prognosis que se pretende realizar.

En este trabajo se formula y aplica una metodología de simulación hidrológica del balance de masa hídrica superficial en cuerpos lagunares, con énfasis en los ambientes descriptos, seguido de una aplicación a caso.

Caso de gestión de efluentes cloacales de Trelew

La ciudad de Trelew (Chubut, Argentina), desde hace varias décadas vierte sus efluentes cloacales en

un área deprimida, de lagunas temporarias, situada al nordeste del Río Chubut entre el ejido de esta ciudad y el de la ciudad de Rawson. Debido a los continuos y crecientes aportes, estas depresiones se han convertido en lagunas permanentes, interconectadas entre sí en ocasiones de grandes lluvias.

En el año 2005, la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco desarrolló los estudios del “*Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew (PMGI-EC Trelew)*” (Serra et al., 2006) para la Municipalidad de Trelew. En la formulación, análisis y selección de alternativas, se destaca la metodología de evaluación de factibilidad ambiental de la gestión de efluentes (Ares et al., 2007).

Para apoyar la evaluación técnica y ambiental se realizó una simulación del balance de masa hídrica superficial.

Los estudios se enfocaron en un SHM-SLE que conforman las denominadas Laguna II o “de la Base”, Laguna III o “del Caño”, Laguna IV o “Laguna Negra”, Laguna V o “Basural”, y Laguna VI o “El Salitral”. A estas depresiones confluyen las aguas de torrentes y cañadones que drenan excedentes pluviales desde terrazas vecinas (Figura 2). El área de estudios está afectada por frecuentes inundaciones urbanas, y severamente impactada por la urbanización de depresiones e impermeabilización de suelos (Bertoni et al., 2004).

El objeto específico de la simulación del balance es estimar la variación de alturas de anegamiento (H), superficies (S) y volúmenes de almacenamiento (V), para distintos escenarios. Los escenarios combinan el ingreso y egreso de masa hídrica en condiciones naturales mínimas, medias y extremas, y por intervención antrópica (vertidos de ductos, canales, irrigación u otros).



Figura 2. Imagen Google Earth, zona Este del Valle Inferior del Río Chubut, área Trelew-Rawson y lagunas.

MATERIALES Y METODOS

Área de trabajo

El caso general se circunscribe a ambientes lagunares típicos de la región patagónica, en paisaje de mesetas, terrazas fluviales o valles, y clima árido-semiárido. El área de trabajo para el caso que se desarrolló abarca la región Este del Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh), incluidas las ciudades de

Trelew y Rawson, y áreas rurales aledañas, en banda de coordenadas geográficas que se extiende desde 43.12 ° a 43.35 ° de latitud Sur, y de 65.0 ° a 65.4 ° de longitud Oeste.

Principales subprocesos hidrológicos

Se describieron los principales procesos y subprocesos hidrológicos adoptados para la simulación del balance hídrico superficial y estimación de

crecidas máximas. La metodología elegida tuvo presente la escasez de registros históricos de limnimetría y aforos, la disponibilidad de otra información física e hidrológica básica, y la posibilidad de apoyar con investigaciones de campo y laboratorio complementarios la evaluación de los ingresos y egresos.

Balance superficial

Se supuso la existencia de conexión superficial entre dos o más depresiones lagunares, por un curso natural, o por canalización. Esta comunicación puede ser modificada en la simulación, para evaluar diferentes comportamientos en distintos escenarios.

En cada cuerpo lagunar puede definirse un perímetro o "frontera" que delimita la línea de máximo nivel de almacenamiento, y suponerse un volumen de control que se proyecta vertical a este perímetro, delimitado por dos planos, superior e inferior. Aplicando el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad, derivado del Teorema del Transporte de Reynolds, la tasa de cambio de la masa en el interior del volumen de control es igual y de signo contrario al flujo neto a través de la superficie de control, según la ecuación (1).

$$\frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \rho \, dv = - \oiint_{S.C.} \rho \, \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

donde: ρ es la densidad del fluido, V la velocidad del fluido, A la sección hidráulica y S el almacenamiento.

En corrientes de agua, para densidad del fluido constante y flujo no permanente la ecuación de continuidad se reduce a la ecuación (2), donde la variación de almacenamiento es igual a la diferencia entre los caudales entrantes y salientes en el volumen de control (Chow et al., 1994):

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (2)$$

siendo: S el Almacenamiento, I el flujo de ingreso, Q flujo de egreso y t tiempo.

Tomando intervalos finitos y valores medios para los flujos de entrada y salida al volumen de control en el período de cálculo, se tiene la ecuación (3).

$$S_f - S_i = (I_t - Q_t) * (t_f - t_i) \quad (3)$$

Los subíndices 'i' y 'f' indican inicio y fin del período, siendo 't' índice del período de tiempo. El período de cálculo es $T = t_f - t_i$.

Teniendo presente el objeto del modelo, y los datos usualmente disponibles, el modelo se desarrolló para un "paso de cálculo" mensual. La ecuación (3) puede reelaborarse según la ecuación (4):

$$\begin{aligned} S_f = & S_i + (P_m * 10 * A) + \\ & + [P_m * 10 * (A_c - A) * C_m] + \\ & + (Q_{pl} * N_d) + (Q_{ef} * N_d) - \\ & - (Q_r * N_d) - (I_b * A * 10 * N_d) - \\ & - (E_v * A * 10 * N_d) - (Q_s * N_d) \end{aligned} \quad (4)$$

donde " S_f " es el almacenamiento al finalizar el período, " m " es el período o mes, " N_d " número de días del mes " m ", " A_c " el área de la cuenca de aportes pluviales, y " A " el área de la laguna. Todos los términos se homogenizan a unidades de volúmenes mensuales en (m^3), para el mes " m ", y las áreas se expresan en (ha).

El primer término " S_i " es el estado inicial del almacenamiento, en (m^3).

El segundo término evalúa la lluvia directa sobre el cuerpo de agua, siendo " P_m " la precipitación media mensual (mm/mes), y " A " el área, función de " H ".

El tercer término evalúa la escorrentía desde los cuencos torrenciales hacia la laguna, estimada en función de " P_m ", del área de la cuenca de aportes " A_c " y un coeficiente medio de escorrentía " C_m " que se asume variable del mes " m ".

El cuarto término evalúa los aportes mensuales por desagües pluviales urbanos estimados con el valor medio diario " Q_{pi} " en (m^3 /día) por " N_d ".

El quinto término evalúa el caudal total de efluentes que ingresa a la laguna, expresado por el valor medio diario " Q_{ef} ", en (m^3 /día), por " N_d ".

El sexto término evalúa la posible derivación para riego, reuso u otros usos de agua desde el cuerpo lagunar, a partir del promedio diario " Q_r ", en (m^3 /día).

El séptimo término evalúa las pérdidas por infiltración o transferencia de flujo subterránea, estimadas a partir de la infiltración básica " I_b " de Horton (Be-

ven, 2004), en (mm/día), y de la superficie de agua en la laguna.

El octavo término evalúa la pérdida por evaporación a partir del valor medio diario “Ev”, en (mm/día), aplicada al área de laguna -función de H-, por “Nd”.

El último término evalúa el volumen mensual del flujo superficial saliente, con el estimador caudal medio diario “Qs” por “Nd”, para cada mes. Los caudales salientes de una laguna hacia otra, aguas abajo, se estiman por métodos opcionales:

- Mediante una función del tipo *altura-caudal*;
- Mediante el volumen que resulta por sobre la cota máxima de nivel de agua aceptado para el sistema, y;
- Submodelos de simulación de descargas producidas por canalizaciones entre lagunas (casos particularizados).

Para estimar el almacenamiento (S) en lagunas, se recurre a las funciones de ajuste que relacionan altura (H) y superficie de inundación (A), de la que puede deducirse el volumen almacenado para cada cota (funciones “HAS”).

La Figura 3 muestra un esquema de entradas y salidas.

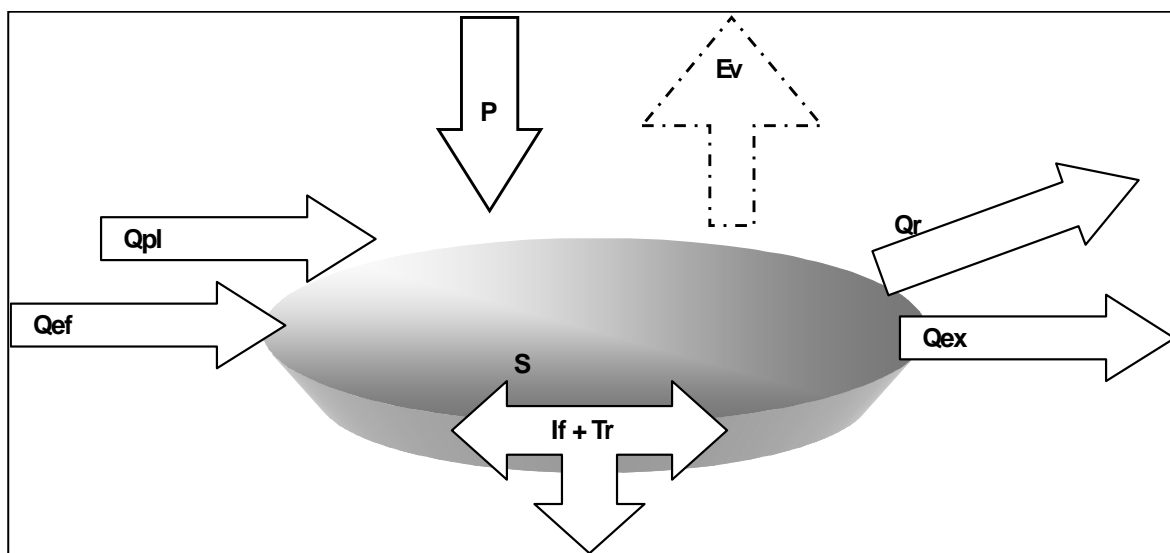


Figura 3. Esquema de entradas y salidas a un cuerpo lagunar.

Lagunas encadenadas

Los balances se desagregan para cada cuerpo lagunar en forma independiente, siguiendo el orden natural de escurrimientos de las depresiones lagunares encadenadas, o con las interconexiones que se determinen. Estas conformaciones pueden ser modificadas en la simulación, estableciendo diferentes interconexiones de escurrimientos de un cuerpo lagunar a otro, con el fin de evaluar distintos escenarios de proyecto posibles.

La modelación se realiza *paso a paso* para un cuerpo lagunar, teniendo por datos de entradas las variables para la condición que se analiza y como parámetros los que definen la geometría de los cuerpos de agua (funciones HAS) y los estimadores en diferentes sub-modelos de cálculo. Las *salidas* producidas en un cuerpo lagunar de “aguas

arriba”, se transforman en *entradas* en el cuerpo lagunar de “aguas abajo”. El proceso se itera para todas las lagunas.

Almacenamiento inicial en cuerpos lagunares

La simulación parte de un almacenamiento inicial (S_i) de los respectivos cuerpos lagunares, como dato del “estado inicial” (HAS).

Una opción es suponer valores medios interanuales de S_i , que deriva de la situación HAS esperada para un año normal. Su estimación se realiza por iteración del procedimiento de cálculo anual, con valores medios interanuales como datos de “entradas”.

Se agrega una función objetivo (FOB) que minimiza en cada iteración la diferencia entre el último valor anual estimado para el almacenamiento inicial y el

valor de almacenamiento estimado para el primer mes del año siguiente en la ecuación (5).

$$FOB = |S_i - S_{12}| \quad (5)$$

En cada iteración se asigna como S_i al valor S resultante para el último período (mes 12). La iteración continúa hasta encontrar la solución que equilibra estos valores (simulación inversa); alcanzado un valor mínimo aceptable de FOB, cercano a '0', se acepta $S_i = S_{Ene}$.

Una vez obtenidos por este método los valores de S_i , la simulación continúa con datos y parámetros de entradas según cada escenario que se determine.

Las "salidas" del modelo muestran el estado de las variables al inicio y fin de cada período de cálculo, en forma de tabla y de gráfico.

Aplicación al caso del subsistema hídrico lagunar II, III, IV, V, VI (Trelew-Rawson)

Este subsistema lagunar recibe los efluentes cloacales de la ciudad de Trelew. El área de lagunas tiene un crecimiento sostenido debido el derrame creciente de tales efluentes, en proporción al crecimiento poblacional y urbano. Siendo un sistema cuasi-cerrado, la masa hídrica se resume fundamentalmente por evapotranspiración.

La simulación del caso tiene por objeto obtener estimadores del balance hídrico de los cuerpos lagunares, para la conformación actual –no natural–, y para diferentes conformaciones e interconexiones superficiales (terraplenes, canales, y otras acciones estructurales) que sustentan alternativas y variantes de intervención.

Aspectos hidro-geomorfológicos

Las lagunas se ubican en el tramo final del VIRCh, entre Trelew y Rawson. Su génesis fluvio-marítima presenta planicies y depresiones, con lagunas permanentes y antiguos meandros inactivos en el valle. Las lagunas quedan delimitadas al Norte por las bardas al pie de la meseta conocida localmente como "Meseta Intermedia"; al Oeste la zona urbana de Trelew; al Sur-Oeste, Sur y Sur-Este el Río Chubut; al Este y paralelo a la línea costera, se desarrollan antiguos cordones litorales que obran de "divisorios" e impiden su desagüe superficial al mar. La sucesión de lagunas I a VI conforman un "Subsistema de Lagunas Encadenadas" (SHM-SLE).

Durante lluvias extraordinarias ingresan importantes derrames provenientes del sistema de presas de laminación del Parque Industrial de Trelew, y de otros cañadones importantes que drenan terrazas vecinas. El progresivo crecimiento de los vertidos urbanos, en combinación con crecidas torrenciales, llena las depresiones produciendo importantes derrames encadenados.

Las lagunas I, II, III, IV y V, se descargan superficialmente en dirección al plano NE-SW, con tendencia a la acumulación final en las depresiones IV y V, que sólo en ocasiones extremas derraman a la VI.

Desde la regulación del Río Chubut por la represa de Ameghino, no se registran ingresos directos por crecidas fluviales a estas lagunas.

Variables y parámetros de "entradas"

Para la aplicación al caso se consideraron los siguientes estimadores como variables de entradas:

Precipitación (P): datos de lluvias mensuales mínimas, medias y máximas interanuales. Funciones IDR y PDR, y datos horarios de tormentas extraordinarias ocurridas en el VIRCh, en Mayo 1992 y Abril 1998 (Chachero, 2008).

Escorrentías: Los derrames pluviales se evaluaron separadamente: a) lluvias directas; b) ingresos desde el drenaje "Canal Zona Norte", con desagüe en Laguna II, compuesto de b1) efluentes pluviales urbanos y b2) drenajes que ingresan desde el sistema de pequeñas presas de laminación de crecidas del "Cañadón del Parque Industrial de Trelew (PIT)"; c) ingresos desde áreas de aportes (torrenciales) por lluvias en la meseta y valle.

a) *Lluvias directas*: evalúa los aportes por lluvias en las lagunas.

b1) *Efluentes pluviales urbanos (Q_{pu})*: se estimaron (ecuación (6)) por el máximo drenaje potencial en el período de cálculo, con un coeficiente de escorrentía $C = 0.6$:

$$Q_{pu} = P * A * C \quad (6)$$

En la Tabla 1 se resumen las superficies de las cuencas de aportes pluviales urbanos.

b2) *Drenajes desde sistema de presas de laminación de crecidas del Cañadón del PIT*: estimado con la

ecuación (6) y un coeficiente de escorrentía $C = 0.10$. Para mejorar la valoración experta de C_m se compararon resultados de corridas de modelo hidrológico lluvia-caudal (MHIG), de tipo determinístico-agregado (Serra, 2008). La aproximación paramétrica se realizó apoyada con estimaciones de crecidas

máximas observadas durante las lluvias extraordinarias ocurridas en Abril de 1998 (Serra, 1999), con un período de retorno cercano a 150 años. El volumen de efluente pluvial estimado como ingresado al sistema en dicha crecida alcanza el orden de 3 Hm^3 . En un año de lluvias medio este valor es cercano a 1 Hm^3 .

Tabla 1. Estimación de superficies de aportes de pluviales urbanos al sistema lagunar II a VI.

Área de aportes	Superficie (ha)
Sistema Zona Norte	353
Sistema Ovoide y Planta de Gas	380
Pluvial Plaza Seca	70
Pluvial Badén Don Bosco	35
Suma Parcial Pluviales Zona Norte	838
Cierre II	4221
Cierre Ferrocarril	540
Cierre III	24
Cierre IV	35
Cañadón del Parque Industrial de Trelew	4820
TOTAL	5658

c) *Drenajes por lluvias en meseta-valle*: Se determinó con la expresión racional simplificada (ecuación (6)). El valor de C_m se adoptó entre 0.1 y 0.3 en distintas áreas, con un parámetro estimado de modo similar. Para un mejor ajuste de C_m se ponderó con resultados de aplicar el método de cálculo de la Precipitación Neta del Soil Conservation Service (Natural Resources Conservation

Service, Department of Agriculture, US) (Ferrer Polo, 1993). Los caudales y derrames máximos producidos por lluvias extraordinarias se determinaron por modelación lluvia-caudal con aplicación MHIG.

La Tabla 2 muestra valores de superficies de referencia para lagunas y áreas de aportes pluviales.

Tabla 2. Superficies de referencia para cada laguna (lluvia directa) y áreas de aportes pluviales desde la meseta.

Laguna	Área de aportes hídricos		
	Meseta-Valle (ha)	Directa (ha)	Total (ha)
Laguna II	600	65	665
Laguna III	---	85	85
Laguna IV	1180	400	1580
Laguna V	520	160	680
Laguna VI	6600	1500	8100
Total	8300	2060	10360

Evaporación: La vegetación en el área es mínima, la transpiración es prácticamente despreciable en proporción a la masa evaporada por el sistema lagunar. Las pérdidas se estimaron a partir del poder evaporante de la atmósfera (PEA), determinado en base a datos de mediciones en tanques evaporímetros de la zona (Estación Experimental INTA Trelew, período 1971-1990, afectadas de un coeficiente de tanque de 0.7).

Pérdidas no atmosféricas: Las pérdidas no atmosféricas son principalmente por infiltración (I_f), variable en función de la superficie de los cuerpos de agua. Se dispuso de datos de 12 ensayos de infiltración de campo, distribuidos en el área de lagunas y de la meseta intermedia aledaña. En menor medida, intervienen otros flujos de "Transferencias" (T_r) por ingresos y egresos menores,

particularmente por influencia de napa freática, desde y hacia los cuerpos de agua. Las pérdidas no atmosféricas se evaluaron globalmente y fueron un parámetro de ajuste.

Efluentes cloacales: conformados por:

- a) Efluentes cloacales urbanos de la ciudad de Trelew. Se vierten por bombeo -Planta Carrasco- y ducto de impulsión a la Laguna III, luego escurren hacia las Lagunas IV y V. Se cuenta con datos de serie histórica de derrames mensuales, estimados en base a registros diarios de horas de bombeo.
- b) Efluentes de la planta potabilizadora de "SERVICOOOP", de Puerto Madryn. Resultan del lavado de filtros y otros vertidos del servicio. Los derrames son estimados con datos proporcionados por dicho servicio.
- c) Efluentes cloacales de la "Base Aeronaval Almirante Zar". Se evaluaron en proporción a la población estable de la base.

Funciones HAS: Las relaciones *altura-superficie de inundación-almacenamiento* fueron estimadas a partir de un mapa base planialtimétrico del área (plano de referencia IGM), elaborado con datos de relevamiento topobatimétrico de las lagunas, que se muestra en Tabla 3, apoyado con:

- Planialtimetría del Valle Inferior del Río Chubut, escala 1:20000, Agua y Energía Eléctrica (1960), Eq. 0.50 m. Fuente: Centro de Documentación DICH, UNPSJB;
- Fotografías aéreas, escala 1:5000 y 1:20000, Fuente: Dirección General de Catastro e Información Territorial, Pcia. del Chubut;
- Batimetría Laguna III. Fuente: Dirección General de Obras Hídricas, EVARSA, Pcia. del Chubut;
- Imágenes satelitales LANDSAT TM, Convenio UNPSJB;
- Modelo Digital de Terreno (MDT), resolución nominal 90 m, obtenido por Internet de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Nacional Aeronautics and Space Administration (NASA).

Tabla 3. Estimaciones preliminares: Relaciones Cota (H) – Superficie inundable (A) y Volumen (V).

Cota (H) IGM	Laguna II		Laguna III		Laguna IV		Laguna V		Laguna V	
	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
(m)	(ha)	(m³)	(ha)	(m³)	(ha)	(m³)	(ha)	(m³)	(ha)	(m³)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.00	-	0	-	0	5.00	25000	-	0	50.0	125000
1.50	-	0	-	0	10.00	62500	-	0	100.0	500000
2.00	-	0	-	0	50.00	212500	10.00	25000	320.0	1550000
2.50	-	0	-	0	100.00	587500	20.00	100000	780.0	4300000
3.00	-	0	-	0	150.00	1212500	50.00	275000	980.0	8700000
3.50	5.00	12500	-	0	267.83	2257075	93.18	632950	1290.0	14375000
4.00	10.00	50000	8.00	20000	292.71	3658413	104.77	1127813	1500.0	21350000
4.50	17.00	117500	16.45	81125	317.58	5184125	116.35	1680600	1750.0	29475000
5.00	25.00	222500	66.30	288000	344.90	6840313	133.18	2304413	1900.0	38600000
5.50	40.00	385000	75.83	643325	372.21	8633075	150.00	3012350	2550.0	49725000
6.00	66.00	650000	86.30	1048650	400.00	10563600	160.00	3787350	2560.0	62500000
6.50	94.00	1050000	90.00	1489400	500.00	12813600	170.00	4612350	---	---

Reuso: datos estacionales de evapotranspiración desde humedales, técnicas naturales de tratamiento de efluentes. Dotación de riego en cultivos forestales, estimada a partir de datos de lluvias y temperaturas medias ponderadas, estaciones de Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Estación Aeropuerto Trelew, período 1901-1950, Estación Centro Nacional Patagónico del CONICET, Puerto Madryn, Mayo 1982-Junio 1994.

La Tabla 4 muestra los siguientes valores medios mensuales adoptados para la simulación:

- Col 1: Valores medios diarios mensuales, (fuente datos: Estación Experimental INTA Trelew, Pcia. del Chubut, período 1971-1990), de evaporación en lagos, -afectados de coeficiente de tanque = 0.7;

- Col 2: Precipitación mensual año 1998 (año de lluvias extraordinarias, mayores registros de la serie observada. Fuente: INTA y SMN, Trelew;
- Col 3 y 4: Precipitación mensual máxima R25 años (sintética), y Precipitación media mensual;
- Col 5: Volumen unitario de evapotranspiración media diaria mensual en carrizales, técnicas naturales de tratamiento de efluentes (FFT, o filtros fito-terrestres);
- Col 6: Volúmenes unitarios medios diarios mensuales de "Necesidades de Riego", para el cultivo forestal de referencia. Estimados a partir de la EVP, por método de Penman-Monteith, FAO (Allen et al., 1998).

Tabla 4. Datos de entadas: precipitación, evaporación, necesidad de riego.

Tabla de estimadores mensuales						
Mes	1	2	3	4	5	6
	EV Lagos c/0.7	Pp 1998	Pp Max 25 años	Pp Media	EV FFT	NR
	(mm/día)	(mm)	Sintética (mm)	(mm)	(m ³ /ha-día)	(m ³ /ha-día)
Enero	6.29	12.8	20	11.1	221.5	84.2
Febrero	5.27	28.4	27	14.9	221.5	69.2
Marzo	3.77	3.2	32	17.6	101.1	45.9
Abril	2.52	254.0	28	15.5	101.1	28.1
Mayo	1.42	24.8	46	25.6	101.1	9.1
Junio	0.98	9.6	25	13.7	87.6	5.3
Julio	1.18	9.0	25	14.1	87.6	3.6
Agosto	1.64	0.6	24	13.3	87.6	7.6
Setiembre	2.55	2.8	24	13.1	105.0	17.9
Octubre	3.85	0.0	23	12.6	105.0	39.7
Noviembre	5.28	12.2	22	12.2	105.0	60.7
Diciembre	6.00	2.2	30	16.7	221.5	77.0
Suma / Año	1240.3	359.6	324.0	180.3	47044.2	
Promedio	3.4	30.0	27.0	15.0	128.80	37.4
Máxima	6.3	254.0	46.0	25.6	221.50	84.2
Mínima	1.0	0.0	19.9	11.1	87.60	3.6

Ajustes

El ajuste y verificación utilizó registros existentes de observaciones mensuales de niveles en Laguna III, período 1994-2005, y registros discontinuos de niveles en Laguna IV (Figura 4). Los parámetros iniciales de infiltración y transferencia se determinaron con criterio experto, ajustando luego por aproximaciones sucesivas hasta lograr resultados satisfactorios, de menor error. Se aceptó que el grado de aproximación alcanza-

do fue suficiente para sostener el análisis de alternativas a nivel preliminar (perfil de proyecto) y para uso en planificación.

Salidas

- *Estado de variables HAS*, al final el período;
- *Caudales salientes*: derrames mensuales (m³/mes) y caudal medio en el período (m³/s) erogado por cada laguna.

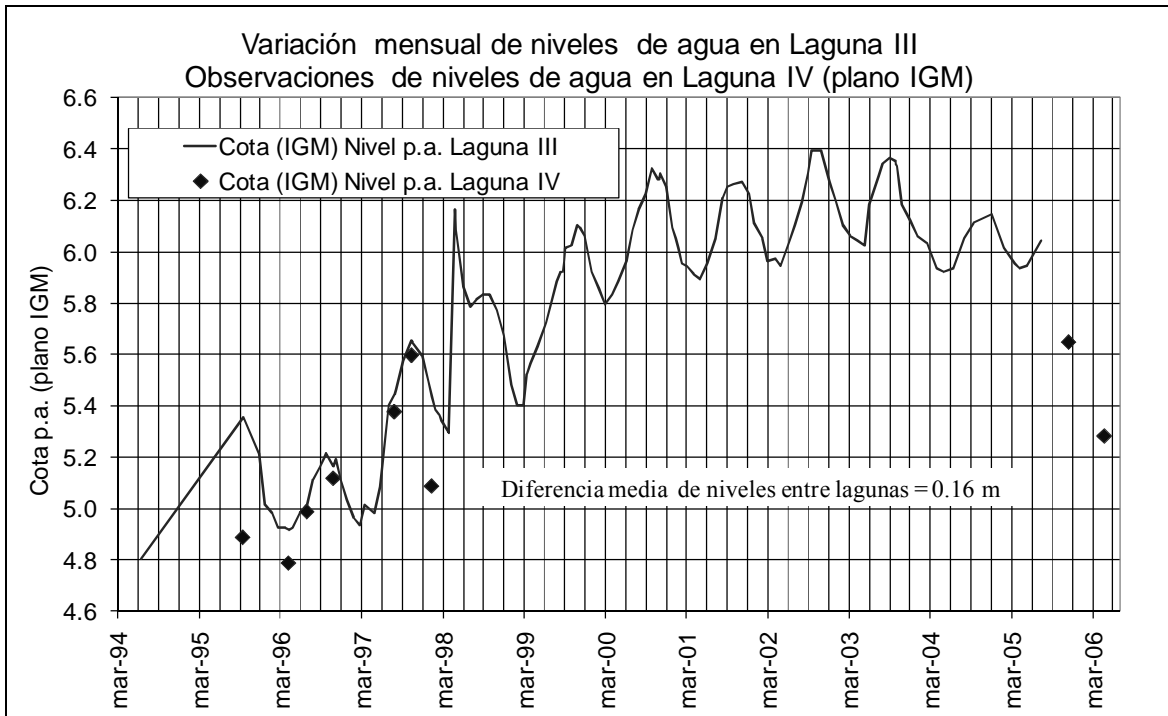


Figura 4. Limnimetría. Variación mensual de niveles en Laguna III (Caño), período 1994-2005. Valores observados en Laguna IV (Negra).

La Figura 5 representa un esquema simplificado de entradas y salidas al sistema lagunar, para la mejor de las alternativas evaluadas a nivel preliminar o "perfil de proyecto". Este modelo de balance hidrológico superficial para el subsistema

de lagunas encadenadas de Trelew-Rawson, conformó una de las herramientas principales de evaluación técnica de las 27 alternativas formuladas y evaluadas a nivel de perfil de proyecto, para el PMGI-EC Trelew.

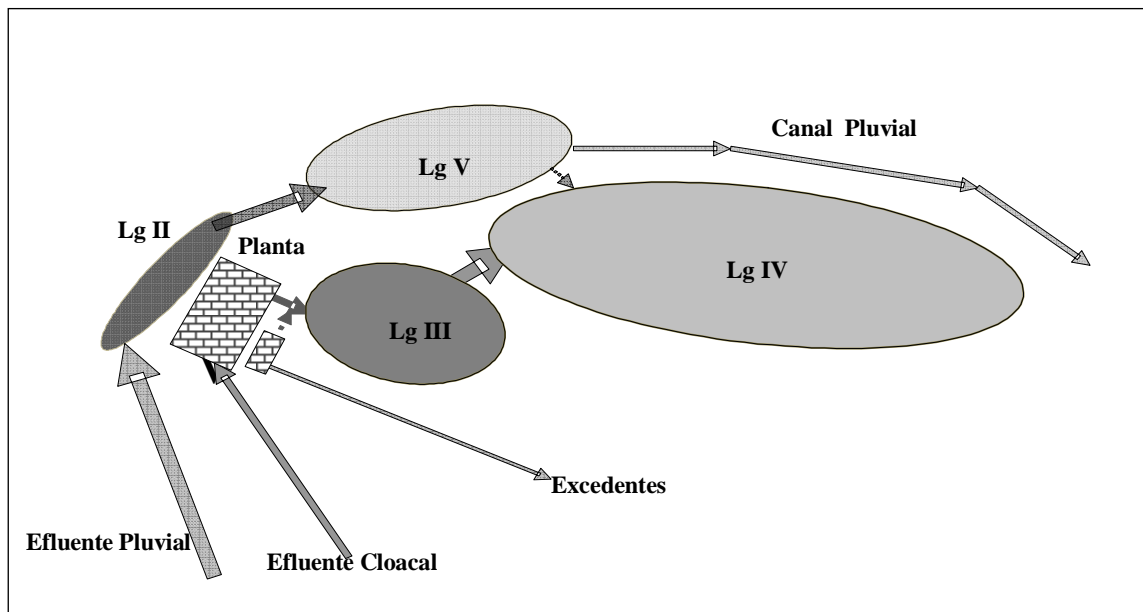


Figura 5. Esquema de componentes e interconexiones superficiales para uno de los escenarios de análisis (Ref. Alternativa 21).

Escenarios y situaciones de proyecto

Los escenarios analizados dependen principalmente de la proyección futura de caudal de efluente cloacal. El perfil del proyecto se adoptó a 25 años. Considerando distintas proyecciones de demanda en el PMGI-EC Trelew se formularon los siguientes escenarios para la situación actual (2006), y proyectada (año 2031).

Para cada uno de los 27 perfiles de proyecto evaluados, se consideraron 2 escenarios de proyección, uno de diseño (EP 1), y otro de verificación (EP 2), con 3 situaciones variantes dependientes del grado de intervención en acciones estructurales y no estructu-

rales, que se resumen en la Tabla 5. Estos dos escenarios y tres situaciones se simularon combinados para dos condiciones de lluvias: 1) año de lluvias medias, y 2) año de lluvias extraordinarias (registro máximo año 1998).

En la Tabla 6 se muestran los principales estimadores de proyección de demanda de caudales efluentes cloacales de la ciudad de Trelew y de otros vertidos (SERVICOOOP Puerto Madryn y Base A. Zar), y en la Tabla 7, caudales medios diarios mensuales de demanda actual, y proyección de demanda para los distintos escenarios y situaciones. La Tabla 8, muestra un resumen anual de escenarios de proyección de demanda de los vertidos del sistema cloacal a las lagunas.

Tabla 5. Escenarios de proyección de vertidos cloacales y situaciones alternativas de proyecto.

Escenario de Proyección	Condición
EP 1	Relación Año 25 / Año 1 = 1.5, (corresponde a una tasa anual de crecimiento poblacional = 1.635 %).
EP 2	Relación Año 25 / Año1 = 2.0, (corresponde a una tasa anual de crecimiento de 2.812 %).
SA	Situación actual. Representa el año inicial o año 1 (2006).
SAM	Situación actual mejorada. Reducción del volumen efluente cloacal total de un 10.4 %, por mejoras en la red colectora (disminución de pérdidas).
SAMI	Situación con mejoras integrales. Reparación de redes, cese de vertidos pluviales urbanos al sistema cloacal, micromedición de agua potable, y otras acciones que reducen 26 % el vertido proyectado.

Tabla 6. Resumen de principales estimadores de proyección de demanda.

Índice	De diseño		De verificación	
Factor de proyección de demanda 2031/2006 (adoptado)	1.5		2.0	
Tasa efectiva 2031/2006 (deducido)	1.635		2.812	
Factor reducción p/Situación Actual mejorada	10.40 %	(*)	10.40 %	(*)
Factor reducción p/Situación c/ Mejoras Integrales y separación de cloacales y drenajes	26 %	(**)	26 %	(**)
Situación año 2005				
Volumen anual de Efluente Cloacal Trelew	7635800	m ³	7635800	m ³
Volumen anual de Efluente SERVICOOOP + Base Zar	542000	m ³	542000	m ³
Volumen total (Cloacal Trelew + Servicoop + Base Zar)	8177800	m ³	8177800	m ³
(*) Mejoras por reducción de intrusión de agua desde napas, 7.5 % (reparación de cañerías troncales).				
(**) Deducen 3.5 % de efluentes pluviales en la red cloacal, 10 % mejoras por micro-medición y 12.5 % de intrusión desde napas.				

Tabla 7. Caudal de efluentes cloacales de Trelew y otros efluentes (SERVICOOOP, Base A. Zar).

Caudales Efluentes medios mensuales. Proyección de demanda: Escenarios y situaciones							
Escenario	SA (2006)	Diseño			Verificación		
Proyección:	Año 2006	Año 2031 (m ³ /día)					
Situación:	SA	SA	SAM	SAMI	SA	SAM	SAMI
Enero	21048	29803	26703	22054	39737	35605	29406
Febrero	23363	33043	29606	24451	44057	39475	32602
Marzo	20467	28653	25673	21204	38205	34231	28271
Abril	22520	31600	28314	23384	42134	37752	31179
Mayo	22253	31241	27992	23118	41654	37322	30824
Junio	23506	33105	29662	24498	44140	39550	32664
Julio	21311	30131	26997	22297	40174	35996	29729
Agosto	21988	30969	27748	22917	41292	36998	30556
Setiembre	23816	33851	30330	25049	45134	40440	33399
Octubre	24665	35247	31581	26083	46996	42108	34777
Noviembre	24479	34913	31282	25836	46551	41710	34448
Diciembre	21049	30163	27026	22320	40217	36034	29761
Suma / Año	8226660	11641014	10430349	8614351	15521352	13907132	11485801
Promedio	22539	31893	28576	23601	42524	38102	31468
Máxima	24665	35247	31581	26083	46996	42108	34777
Mínima	20467	28653	25673	21204	38205	34231	28271

Ref.: SA: Situación actual - SAM: Situación actual con mejoras - SAMI: Situación actual con mejoras integrales

Tabla 8. Resumen de escenarios de proyección de demanda, vertidos del sistema cloacal.

Escenarios del sistema cloacal (Año 1 = 2006, Año 25 = 2031)						
Escenario de diseño (EP1): (Situación Actual con Factor 2031/2006 = 1.5)						
Situación	Trelew		SERVICOOOP y Base A. Zar		Total	
	2006	2031	2006	2031	2006	2031
	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³
1- Situación Actual	7761	11641	466		8227	11641
2- Situación Actual Mejorada		10430				10430
3- Mejoras integrales de colección		8614				8614
Escenario de verificación (EP2): (Situación Actual con Factor 2031/2006 = 2.0)						
Situación	Planta Trelew		Servicoop y Base A. Zar		Total	
	2006	2031	2006	2031	2006	2031
	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³	x 1000 m ³
1- Situación Actual	7761	15522	542		8303	15522
2- Situación Actual Mejorada		13907				13907
3- Mejoras integrales de colección		11486				11486

Perfiles de Proyecto del PMGI-EC

El modelo se utilizó en el análisis y evaluación técnica del balance hidrológico superficial de los cinco cuerpos lagunares, para cada una de las conformaciones (interconexiones superficiales) que se formularon para 27 esquemas alternativos y variantes de solución en el PMGI-EC Trelew, incluida la evaluación de la situación actual "SA".

Las distintas opciones de solución se construyeron combinando opciones de colección, tratamiento y disposición final del efluente tratado (Figura 6):

- *Colección*: tres opciones de "colección" diferentes para los efluentes cloacales, urbanos: sin mejoras, con mejoras, y con mejoras integrales en la red colectora.
- *Tratamiento*: siete esquemas diferentes de tratamiento del efluente cloacal, que combinan soluciones en plantas convencionales de barros activados, estanques facultativos y aeróbicos, y en humedales.
- *Disposición final del efluente tratado (DFET)*: 7 opciones diferentes de DFET: el mar, el Río Chubut, el bajo de "El Salitral", la "Laguna del Diablo", el "Bajo Simpson", y combinados.

En dichos estudios se concluyó que el Perfil de Proyecto mejor calificado, evaluado con "criterio técnico, económico y ambiental" resultó la denominada "Alternativa 21", seguida de la Alternativa 26.

Excedentes: El PMGI-EC Trelew define los excedentes como los caudales necesarios de derivar fuera del sistema de lagunas, por superar el máximo almacenamiento admitido. La magnitud de los mismos depende en gran parte del volumen de efluentes vertidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escenario de Situación Actual

Considerando el escenario SA (año 2006), para un año de lluvias medias y un año de lluvias extraordinarias (caso 1998), se arribó a los siguientes resultados:

a) Año de "lluvias medias"

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de salidas resultantes del balance hídrico mensual en Lagunas

IV+V (conjuntas), escenario de situación actual (SA), y lluvias medias mensuales interanuales.

- Las lagunas II y III se mantienen colmadas la mayor parte del año (sus niveles dependen del umbral de descarga en lagunas IV y V).
- Las Lagunas IV y V varían en sus niveles desde cota 5 m (verano) a 6 m (invierno). Se encuentran colmadas desde el final del invierno hasta el comienzo del verano.
- Lluvias ocasionales y ordinarias, pueden producir desbordes menores en Laguna IV hacia Laguna VI y niveles elevados en el área de Lagunas II y III.
- Lluvias ocasionales y extraordinarias, pueden producir desbordes importantes en Laguna IV hacia Laguna VI, y niveles altos en Lagunas II y III.

b) Año de lluvias extraordinarias (1998)

Presenta inundaciones generalizadas, en las que se destaca:

- Desbordes de magnitud elevada en zona Este de Laguna IV.
- Descargas superficiales hacia Laguna V del orden de 3.2 Hm³/año y caudales medios mensuales en el mes pico del orden de 0.7 m³/s.
- Niveles muy elevados y persistentes en las lagunas II y III, cuyas colas de remanso influyen en las descargas hacia el Canal Zona Norte (Laguna I). Pérdida de eficiencia de descarga del sector del pluvial norte de Trelew con consecuentes anegamientos de áreas urbanas y suburbanas.
- El almacenamiento en Laguna VI puede ser "reducido", "medio" o "elevado", dependiendo de la magnitud de la masa hídrica pluvial ingresada al sistema desde Laguna IV, y desde los aportes aluvionales propios de este cuenco que aportan desde la meseta intermedia.
- La capacidad de almacenamiento en Laguna VI es muy elevada, aproximadamente 20 Hm³ a cota 4 m, con una superficie inundada cercana a 1500 ha. Consecuentemente, tiene suficiente capacidad para laminar crecidas y resumirlas por evaporación. En casos de superar los volúmenes máximos, los derrames siguen el curso natural de antiguos meandros del río.

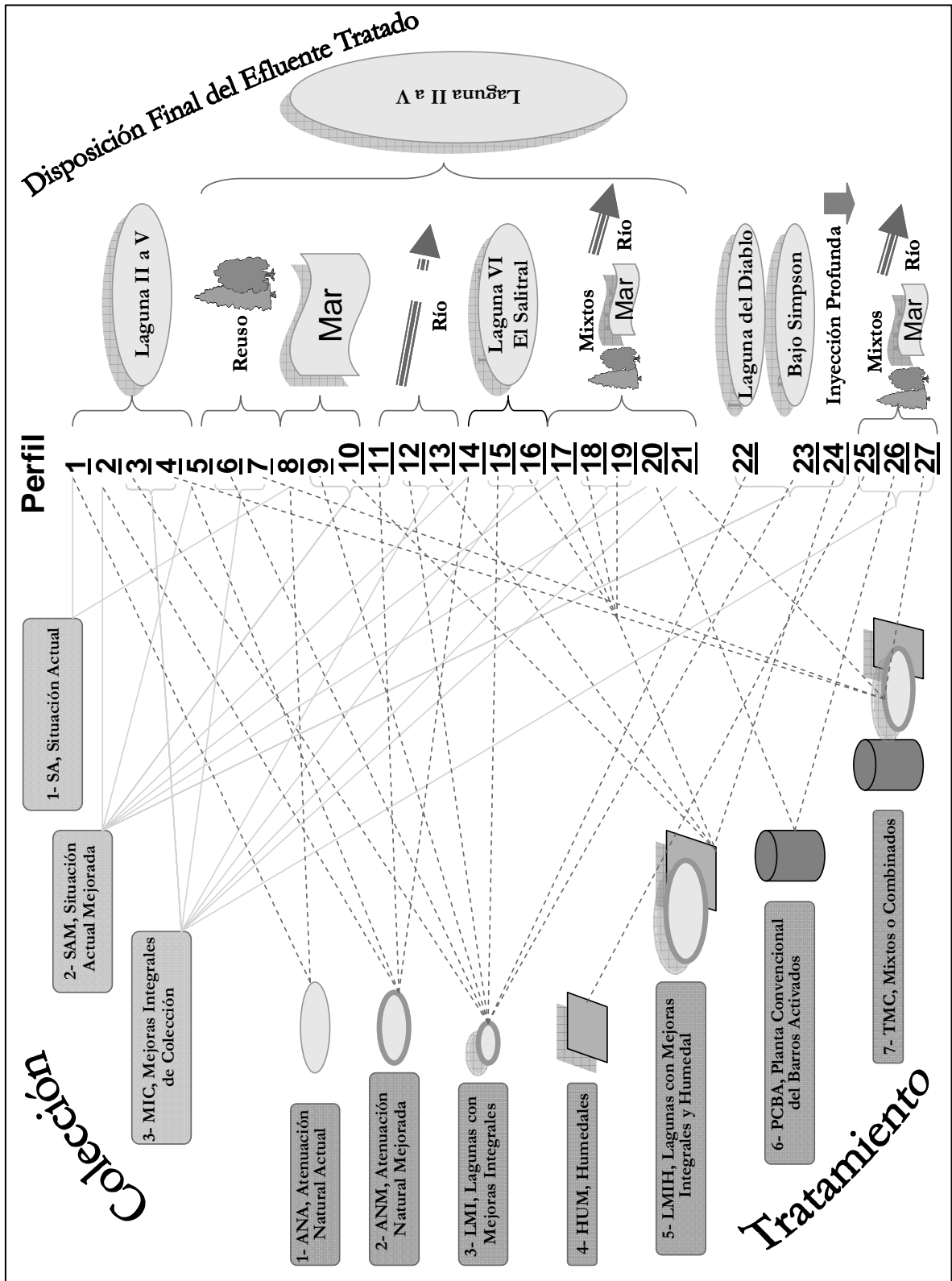


Figura 6. Esquema de alternativas y variantes (Fuente: PMGI-EC Trelew).

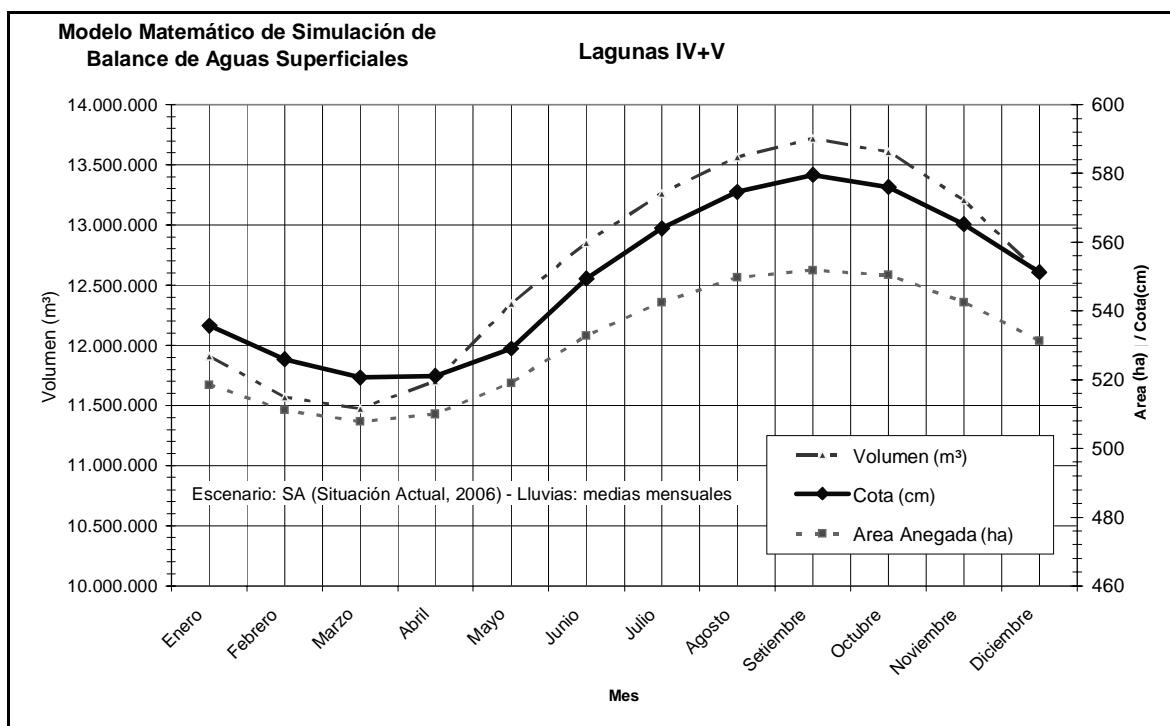


Figura 7. Ejemplo de resultado de balance hídrico mensual en Laguna IV+V (conjuntas), escenario de Situación Actual (SA), lluvias medias mensuales interanuales.

Resumen de resultados para la alternativa mejor calificada

Las Lagunas II y V, que colectan y regulan aguas pluviales, se mantienen en un entorno de entre 120 y 160 ha en años de precipitaciones medias, y entre 120 y 180 ha en años de lluvias extremas. Superada la capacidad máxima de 180 ha, los excedentes se evacuan por el canal pluvial previsto al Norte de Laguna IV, siguiendo las pendientes naturales hacia el bajo de El Salitral.

En la Figura 8 se muestran estimaciones de la variación de la superficie de inundación para el conjunto

de lagunas II, III, IV y V, para derrames de efluentes cloacales crecientes.

En la Tabla 9 se presentan los estimadores de cota de inundación máxima para las lagunas II+V y III+IV, en diferentes escenarios de crecimiento de demanda del sistema cloacal y para dos suposiciones de lluvias anuales (medias y extremas). La Tabla 10 refiere a superficies de inundación.

En casos de lluvias excepcionales pueden producirse excesos pluviales que descargan hacia “El Salitral”.

Tabla 9. Estimadores de referencia: cotas de inundación para grupo de Lagunas II + V y Lagunas III + IV.

Escenario	Cotas de anegamientos (m) (plano IGM)			
	Lagunas II y V		Lagunas III y IV	
	c/Pp Medias	c/Pp 1998	c/Pp Medias	c/Pp 1998
Situación actual (2006)	5.3-5.8	5.3-6.0 (*)	3.4-3.8	3.4-4.0
Condición de Diseño (25 años)	5.3-5.8	5.3-6.0 (*)	4.1-4.5	4.1-4.7
Condición de Verificación (25 años)	5.3-5.8	5.3-6.0 (*)	4.8-5.0 (**)	4.8-5.0 (**)

(*) Se suponen descargas desde Laguna V por el Canal Pluvial y Zanja de Guardia al Norte de Laguna IV.
 (**) Se suponen excesos a la capacidad de almacenamiento y evaporación en Lagunas III y IV, requeridos derivar fuera de este subsistema.

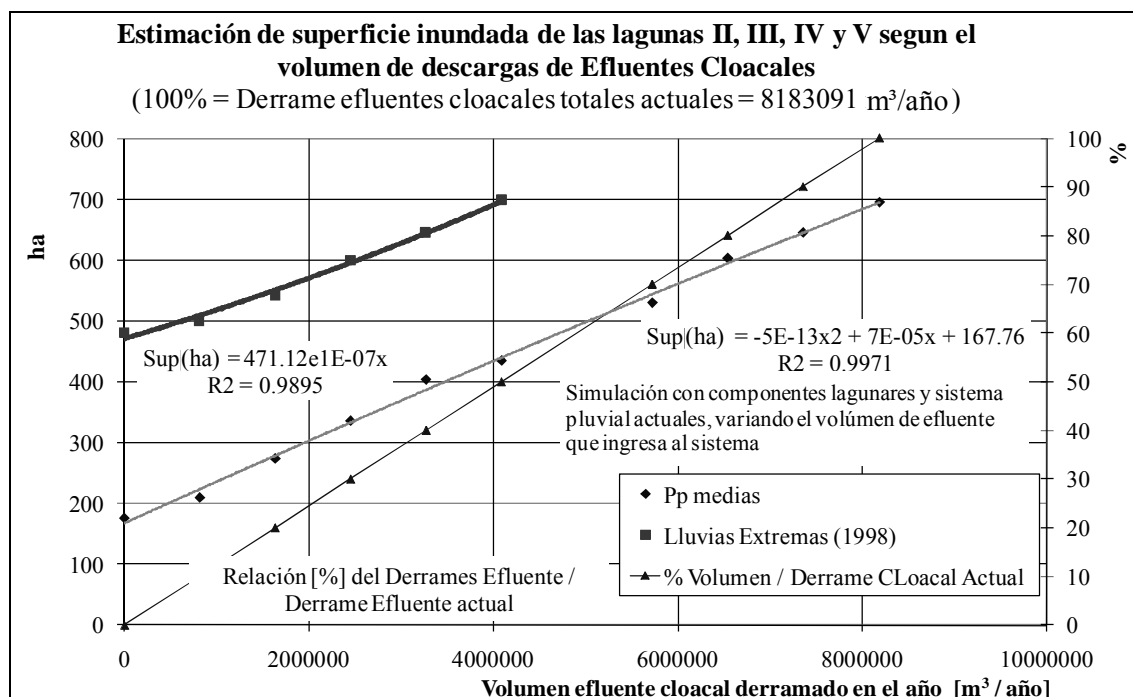


Figura 8. Estimación de la variación de la superficie de inundación para el conjunto de Lagunas II a V, en escenarios crecientes de derrames de efluentes cloacales.

Tabla 10. Estimadores de referencia: Superficies inundadas para el conjunto de Lagunas II, III, IV y V.

Escenario	Superficie de anegamiento total en II, III IV y V (ha)	
	c/Pp Medias	c/Pp 1998
Situación natural, sin efluentes cloacales	70 - 210	80 - 400
Situación actual (2006), Sin Proyecto	630 - 830	> 850
Situación actual (2006), con Proyecto	420 - 490	420 - 530
Condición de Diseño (25 años)	470 - 550	470 - 610
Condición de Verificación (25 años)	570 - 650	570 - 680

Tabla 11. Estimadores de referencia: Volúmenes hídricos excedentes (líquidos tratados) desde las Lagunas III y IV.

Escenario	Volúmenes excedentes desde Lagunas III y IV			
	c/Pp Media		c/Pp 1998	
	Volumen Anual (Hm³)	Q Medio Anual (l/s)	Volumen Anual (Hm³)	Q Medio Anual (l/s)
Situación actual (2006)	Sin excedentes			
Condición de Diseño (25 años)	Sin excedentes			
Condición de Verificación (25 años)	1.5	45	2.3	73

Excedentes líquidos requeridos derivar fuera del subsistema de lagunas, estimados por encima de la cota y superficie de anegamiento máximo admitido.

El conjunto de lagunas III y IV presentan excesos en un escenario de crecimiento de demanda significativo, por sobre las condiciones de diseño (escenario de verificación). Es necesario prever la derivación del volumen de agua excedente por sobre el almacenamiento máximo admitido fuera de este sistema.

En la Tabla 11 se muestran estimadores de volúmenes excedentes por sobre la capacidad máxima admitida para Lagunas II a IV. Estos excedentes, en el supuesto de producirse, deben prever su vertido fuera del sistema lagunar.

CONCLUSIONES

El modelo de balance de masa hídrica aplicado en cuerpos lagunares conforma una herramienta útil para la predicción y prospectiva de situaciones hidrológicas que puedan evolucionar en torno de ambientes lagunares.

La simulación del caso "Laguna Negra", en la gestión de efluentes de la ciudad de Trelew, se efectuó con escasez de datos hidrométricos de aforos y niveles en todas las lagunas. Sin embargo, la abundante información física del área de estudios permitió, con paso de cálculo mensual, obtener resultados en grado de certeza aceptable para el objeto y propósito de uso de los mismos. Se obtuvieron índices volumétricos, alturas y áreas inundables, de importancia para establecer prognosis en cada escenario simulado.

Los resultados obtenidos son estimadores válidos para predecir el comportamiento del sistema de lagunas, tanto para evaluar la situación actual como distintos escenarios de intervención posibles (acciones estructurales y no estructurales).

Se comprobó la limitación de las depresiones lagunares existentes entre Trelew y Rawson para contener mayores derrames de efluentes, siendo necesario establecer otro destino final de estos efluentes, tratados o no tratados.

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A, Área, superficie de agua en cuerpo lagunar.
 CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.
 DFET, Disposición final de efluentes tratados.
 DICH, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica.

EVARSA, Empresa de Evaluación de Recursos Sociedad Anónima.

FOB, Función objetivo.

H, Altura hidrométrica en cuerpo lagunar.

HAS, Altura hidrométrica, área, almacenamiento, en un cuerpo lagunar.

IGM, ex Instituto Geográfico Militar, actual IGN (Instituto Geográfico Nacional).

INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

PDR/IDR, Precipitación/intensidad, duración, recurrencia.

PEA, Poder evaporante de la atmósfera.

PIT, Parque Industrial de Trelew, Pcia. del Chubut.

PMGI-EC Trelew, Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew.

S, Almacenamiento en cuerpo lagunar.

SERVICOOP, Cooperativa de Servicios Públicos de Puerto Madryn, Chubut.

SHM, Sistema hidrológico mixto.

SLE, Sistema/subsistema lagunar encadenado.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional.

UNPSJB, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Chubut, Argentina.

VIRCh, Valle Inferior del Río Chubut (Patagonia, Argentina).

REFERENCIAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 1998. Evapotranspiración del cultivo: Directrices para los requerimientos de agua de los cultivos. *Irrigación y drenaje*. Libro 56. ONU-FAO, Roma, Italia.
- Ares, J.; Serra, J.; Villafañe, A.; Testino, A. y Malnero, H. 2007. Evaluación de factibilidad ambiental de alternativas de gestión de efluentes cloacales de Trelew (Chubut). En XXI Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2007, Tucumán, Argentina.
- Bertoni, J. C.; Ambrosino, S.; Daniele, A.; Maza, J. A.; Paoli, C. U. y Serra, J. 2004. *Inundaciones urbanas en la Argentina*. 1ra. Ed. Editorial Universitäts, UNC. v. I, p. 155-195. ISBN:9879406761. Córdoba, Argentina.
- Bertoni, J. C. 2006. Inondations urbaines en Amérique Latine: Réflexions sur le rôle des facteurs de risque. Frontiers in flood research. Le point de la recherche sur le Crues. *International Association of Hydrological Sciences, IAHS-AISH Publication*. (305)-123-141.
- Beven, K. 2004. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. Lancaster Univer-

- sity. *Hydrological Processes* 18, 3447-3460 (2004). Lancaster. UK.
- Calver, A. y Anderson, M. G. 2004. Conceptual framework for the persistence of flood-initiated geomorphological features. *Transactions of the Institute of British Geographers*, Volume 29, Issue 1, Page 129, doi: 10.1111/j.0020-2754.2004.00118x.
- Chachero, M. J. 2008. Actualización de las ecuaciones de tormentas en el VIRCh. SCyT, UNPSJB cd-dich, PI 194-IA/1998b.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994. *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: Ed.: Mc Graw-Hill Interamericana S.A., ISBN: 958-600-171-7.
- Ferrer Polo, F. 1993. Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas. Monografía M37, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, CEDEX, ISSN 0211-8203, Isbn: 84-7790-168-6.
- Serra, J. 1999. Riesgo de Erosión Hídrica en el Cuenco Aluvional del Área Dique Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut. *Cuadernos del CURIHAM*, UNR Editora. ISSN No. 1514-2906, Rosario, Argentina, 5, (2), 67-88.
- Serra, J. 2006. Sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de meseta. *Cuadernos del CURIHAM*, UNR. Editora. ISSN N° 1514-2906, 12 (2), pp. 25-41.
- Serra, J.; Ares, J.; Testino, A.; Feller, J.; Malnero, H.; Chachero, M.; Stampone, J.; Gallastegui, R.; Pagnoni, G.; Regnando, M.; March, M.; Scalise, A. y Sainz Trápaga, J. 2006. Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew (PMGI-EC Trelew)". Convenio UNSJP; Municipalidad de Trelew. En Conferencias de gestión de efluentes cloacales de Trelew. Julio de 2006. Tomos 1 a 17. Centro de Documentación CD-DICH, UN Patagonia SJB, Trelew.
- Serra, J. 2008. *MHIG, modelo hidrológico Gaiman: GMRT, Guía de Modelos y Referencias Técnicas*. Chubut. Autor-editor, 2007. e-Book. ISBN 978-987-05-6274-0. <http://www.librosar.com.ar/portal/detallesLibro.aspx?codigo=271448>.

Artículo recibido el 04/2011 y aprobado para su publicación el 05/2011.