

# **BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE**

**UNIDAD CURRICULAR:  
DISEÑO HIDROLÓGICO**



**INSTITUTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS E INGENIERÍA AMBIENTAL (IMFIA)  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

---

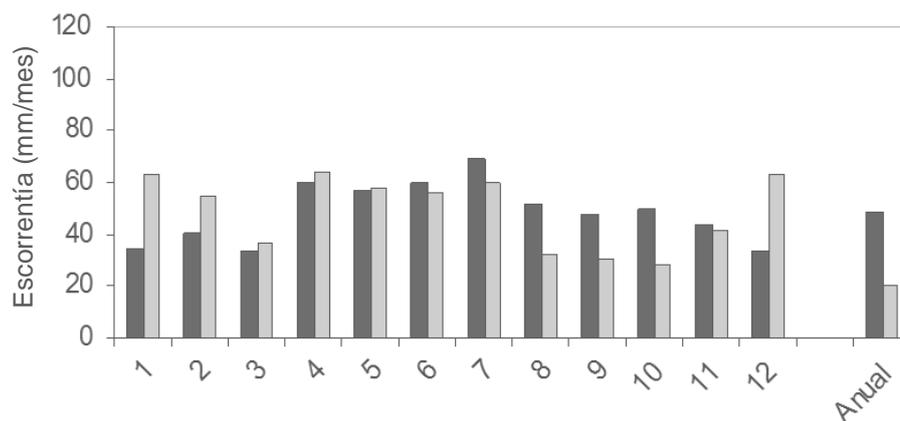
## Índice

Introducción.....	3
1. Diseño de un embalse.....	5
2. Balance hídrico .....	7
2.1. Formulación del balance en cuerpos de agua .....	7
2.2. Procedimiento de cálculo .....	10
2.3. Datos necesarios .....	13
3. Bibliografía .....	14

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad temporal del escurrimiento en los cursos de agua tiene habitualmente como resultado para un uso determinado del recurso, la ocurrencia de excesos hídricos en períodos húmedos y su escasez en períodos secos.

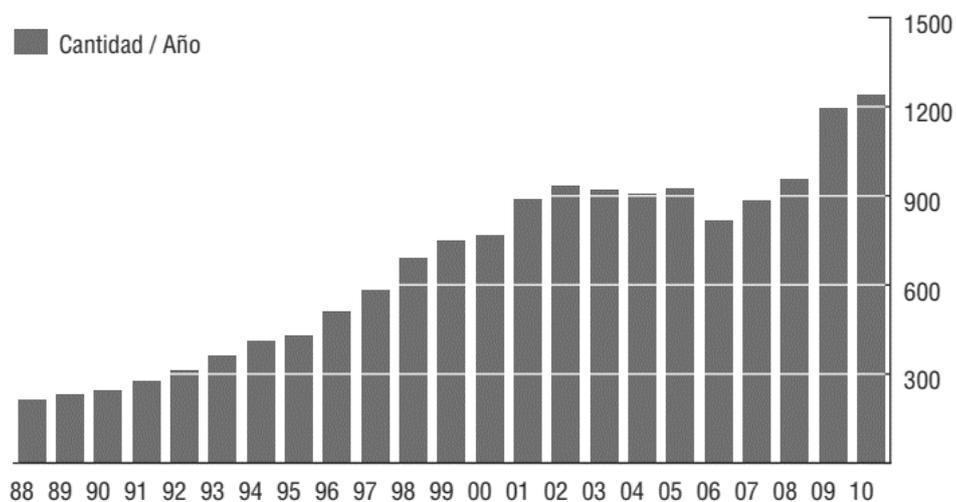
En el Uruguay esta situación resulta evidente observando la variabilidad interanual de los escurrimientos mensuales de un curso, en comparación con la amplitud del propio ciclo anual (Figura 1).



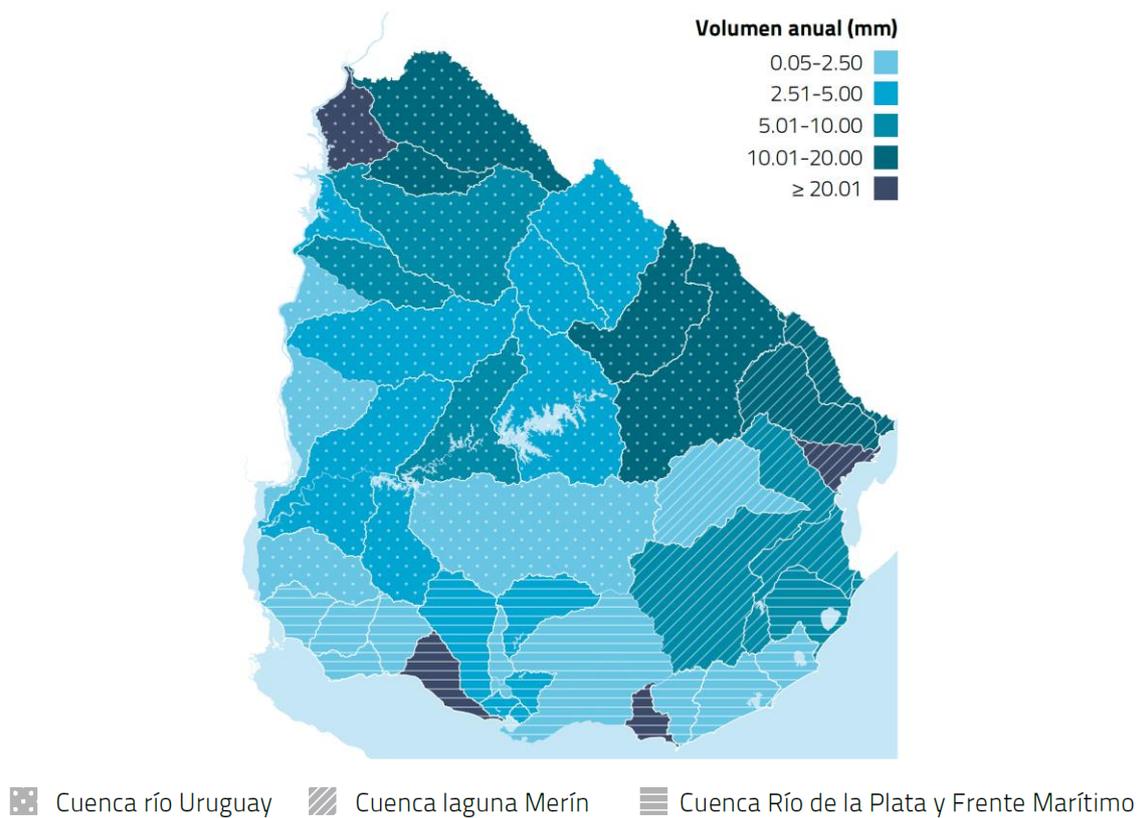
**Figura 1: Ciclo medio anual de caudal y desviación estándar (Zona Sur del Uruguay período 1985-1999).**

La principal respuesta tecnológica ante esta situación es la construcción de embalses, cuyo objetivo es el manejo de la disponibilidad del recurso en función de la demanda del mismo, mitigando así el efecto de su variabilidad natural.

En efecto, para nuestro país, esto es una práctica usual (Figuras 2 y 3), especialmente para los usuarios de mayor consumo del recurso, históricamente, regantes de arroz.



**Figura 2: Evolución de embalses para riego en Uruguay según inventario DINAGUA. Fuente: Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas (2011).**



**Figura 2: Distribución geográfica y volumen de uso anual por unidad de área de los embalses existentes en Uruguay. Fuente: Plan Nacional de Aguas, Capítulo 8 (2017).**

En este sentido, para evaluar la disponibilidad del recurso agua que llega a un embalse, habitualmente se implementa como herramienta principal el balance hídrico al mismo. Esto permite en forma simplificada, estimar la cantidad del recurso y su distribución a lo largo del año y los años, así como evaluar la garantía del cumplimiento de las demandas.

# 1. DISEÑO DE UN EMBALSE

A continuación, se resumen los principales aspectos a definir en el diseño de un embalse:

- **Propósito del embalse:** el embalse puede tener un único o múltiples propósitos (riego, generación de energía, suministro de agua, control de inundaciones, recreación, etc.).
- **Demanda de agua a satisfacer:** se debe definir el tipo de demanda, sus características y volúmenes necesarios en función del tiempo.
- **Selección del sitio:** se debe tener en cuenta la aptitud ambiental del lugar (para minimizar la generación de impactos ambientales y socioeconómicos negativos), así como la “eficiencia” de la inversión (relación volumen máximo embalsado/volumen de la obra a construir, disponibilidad de material en las inmediaciones, grado de impermeabilidad, valor productivo de los suelos a inundar, etc.).
- **Disponibilidad de agua:** se debe determinar el volumen de escurrimiento proveniente de la cuenca de aporte al embalse. En el caso de cuencas no aforadas, este escurrimiento puede ser calculado mediante una modelación hidrológica, en particular con el modelo de Temez.

El área de la cuenca debería tener un tamaño suficiente para que, aún con la variabilidad existente en los escurrimientos anuales, el aporte al embalse cubra el volumen de agua a almacenar para el período seco. Sin embargo, tampoco debería ser muy grande en relación con la capacidad de almacenamiento del embalse, para que las estructuras necesarias de vertido funcionen realmente como vertederos de emergencia solo ante eventos verdaderamente extremos.

Se define un indicador de la capacidad de regulación interanual como: la relación entre la capacidad de almacenamiento (entre los niveles de la toma y vertedero) y el volumen de escurrimiento medio anual de aporte de la cuenca.

- **Caudal ambiental:** la infraestructura a construir deberá respetar el caudal ambiental, que establece qué características del régimen hidrológico natural es necesario preservar aguas abajo de la intervención en el curso y hacia la planicie de inundación para sostener los valores característicos del ecosistema y el bienestar humano. Dentro del régimen hidrológico se incluye, por supuesto, el ciclo anual, por lo que las características del caudal ambiental podrán variar estacional o incluso mensualmente.
- **Capacidad del embalse:** para estimar la capacidad de almacenamiento del embalse es necesario realizar un relevamiento topográfico de la zona, a partir del cual se construyen las curvas que relacionan el nivel de agua en el embalse, el volumen almacenado y el área inundada para cada cota.
- **Elevación y capacidad del vertedero:** se debe definir la cota de vertido (que condiciona la altura de la presa) y la capacidad y geometría del vertedero, de forma que sea capaz de evacuar el agua proveniente de las avenidas que el embalse no puede retener, restituyéndola al cauce natural aguas abajo de la presa, de una manera segura y eficaz. En general, para presas de materiales sueltos, el vertedero se

materializa como un vertedero tipo canal excavado fuera del cuerpo de la presa y protegido con pasturas naturales.

- **Capacidad y estructuras de descarga:** se debe definir la cota y capacidad de la obra de toma, de manera que garantice la conducción del agua hacia el uso que esta tiene asignado. El volumen embalsado entre la cota de la obra de toma y la cota de vertido, determina el volumen útil del embalse.

Un mayor detalle sobre las etapas de un proyecto de una represa para riego se presenta en el “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas”, MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011, publicado por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), como entidad responsable de la gestión de los recursos hídricos, a modo de guía de diseño para los represamientos hidráulicos, en particular con destino de riego. El mismo se encuentra disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-diseno-construccion-pequenas-presas>.

## 2. BALANCE HÍDRICO

Balance entre el agua que ingresa o egresa a un sistema en un intervalo temporal determinado.

Se expresa a partir de la ecuación de continuidad aplicada a un volumen de control representativo del sistema:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t)$$

donde  $I(t)$  son los ingresos al sistema o volumen de control,  $O(t)$  son las salidas del sistema y  $S$  es la variable de estado que representa el volumen de agua almacenada. La variación temporal de este volumen queda expresada a través de su derivada respecto al tiempo.

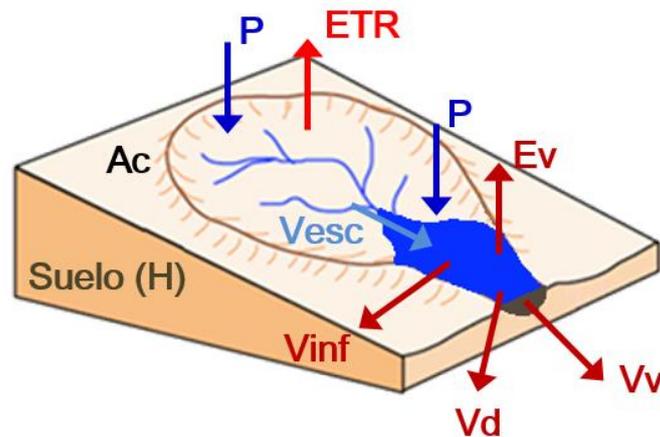
Como vimos anteriormente, el balance hídrico puede ser aplicado tanto a una cuenca, como a un cuerpo de agua: laguna, tajamar, embalse, etc. En este caso, nos concentraremos en el balance a un embalse.

A continuación, se resumen algunas de las principales aplicaciones de los modelos de balance hídrico en cuerpos de agua:

- Evaluar la evolución temporal del volumen de agua en lagos, lagunas, embalses.
- Diseño de embalses (volumen de almacenamiento).
- Análisis de la garantía de embalses para el cumplimiento de demandas.
- Estudio de diversos escenarios: variabilidad y cambio climático, cambio de usos del suelo, etc.
- Evaluar los tiempos de residencia del agua para asociar a modelos de calidad de aguas, nutrientes, etc.

### 2.1. Formulación del balance en cuerpos de agua

En la Figura 4 se presenta un esquema de una cuenca en la que en su punto de cierre se ubica un embalse para almacenar agua para diversos fines. A efectos del dimensionado del volumen a embalsar para cumplir con determinada demanda de uso del recurso, el balance hídrico al embalse constituye la herramienta adecuada.

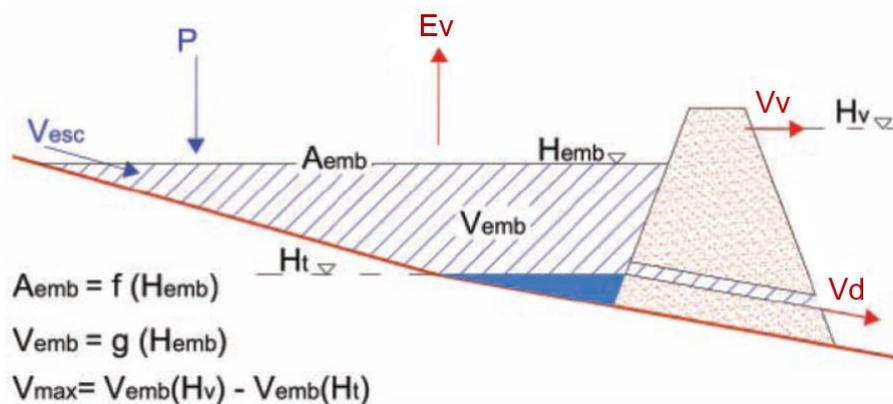


**Figura 4: Balance hídrico en un embalse o cuerpo de agua situado en el punto de cierre de una cuenca.**

El balance hídrico al embalse requiere reconocer variables de entrada y salida y una variable de estado:

- La variable de estado es el volumen del embalse "**Vemb**" en un instante dado (mes, para el caso de paso mensual).
- Como variables de entrada se reconocen la precipitación "**P**" en la superficie del embalse y el volumen de escurrimiento "**Vesc**" que constituye el escurrimiento proveniente de la cuenca. En cuencas no aforadas, este escurrimiento puede ser estimado mediante el modelo de Temez.
- Como variables de salida del embalse se identifican la evaporación en la superficie del embalse "**Ev**", el volumen de demanda "**Vd**", el volumen vertido "**Vv**" y las pérdidas por infiltración "**Vinf**" (que habitualmente se desprecian frente a los demás términos). La evaporación del embalse se determina habitualmente a partir del dato de evaporación de Tanque "A", considerando su ciclo anual reducido por un factor de 70%, debido a las diferencias de profundidad y materiales constitutivos de uno y otro. El volumen de demanda corresponde a la suma de todas las extracciones del embalse para los diversos fines: riego, agua potable, caudal ambiental, etc. El volumen vertido es el volumen mensual de agua evacuada por el vertedero de la presa que conforma el embalse, esta situación ocurre siempre que el nivel del embalse supera el nivel de vertedero "**Hv**".

En la Figura 5 se presenta un esquema del embalse con las variables antes mencionadas. En rojo se identifican las salidas y en azul las entradas al sistema (embalse).



**Figura 5: Esquema de un embalse señalando las variables de entrada y salida al sistema. Fuente: Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas (2011).**

En dichas condiciones, la ecuación de balance hídrico al embalse es:

$$\Delta V_{emb} = V_{esc} + P \cdot A_{emb} - E_v \cdot A_{emb} - V_{inf} - V_d - V_v \quad (*)$$

Siendo:

$\Delta V_{emb}$ : variación de volumen embalsado entre el mes anterior y el mes actual ( $m^3$ )

$V_{esc}$ : volumen de escorrentía aportado por la cuenca en el mes actual ( $m^3$ )

$$V_{esc} = A_T(Temez) * A_c$$

$A_T(Temez)$ : escorrentía total según Temez en el mes actual (m)

$A_c$ : área de la cuenca ( $m^2$ )

P: precipitación en el embalse (m)

$E_v$ : evaporación en el embalse (m)

$A_{emb}$ : área del embalse en el mes actual ( $m^2$ )

$V_{inf}$ : pérdidas por infiltración en el embalse en el mes actual ( $m^3$ ) (despreciables)

$V_d$ : suma de volumen de demanda para todos los usos del embalse ( $m^3$ )

$V_v$ : volumen vertido en el mes actual ( $m^3$ )

El balance se realiza mes a mes durante toda la serie de datos disponibles de precipitación mensual, recomendándose un mínimo de treinta años.

La ecuación de balance hídrico se completa con una ecuación que relaciona el nivel de agua en el embalse, el volumen embalsado y el área inundada para cada cota: curvas cota-superficie-volumen (H-A-V) del embalse. Estas relaciones resultan de la topografía de la zona del embalse. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de ello, indicándose las cotas (nivel de agua en el embalse) en el eje inferior, el volumen embalsado para cada cota en el eje vertical derecho (curva roja) y la superficie inundada para cada cota en el eje vertical izquierdo (curva azul). Cabe destacar que, estas curvas pueden modificarse luego de la construcción del embalse debido a la sedimentación en el mismo. Para mantener la profundidad y capacidad del embalse es necesario que el flujo de agua superficial esté libre de sedimentos

provenientes de la erosión dentro la cuenca, para lo cual se debería realizar un adecuado control de la erosión en el área de aportes.

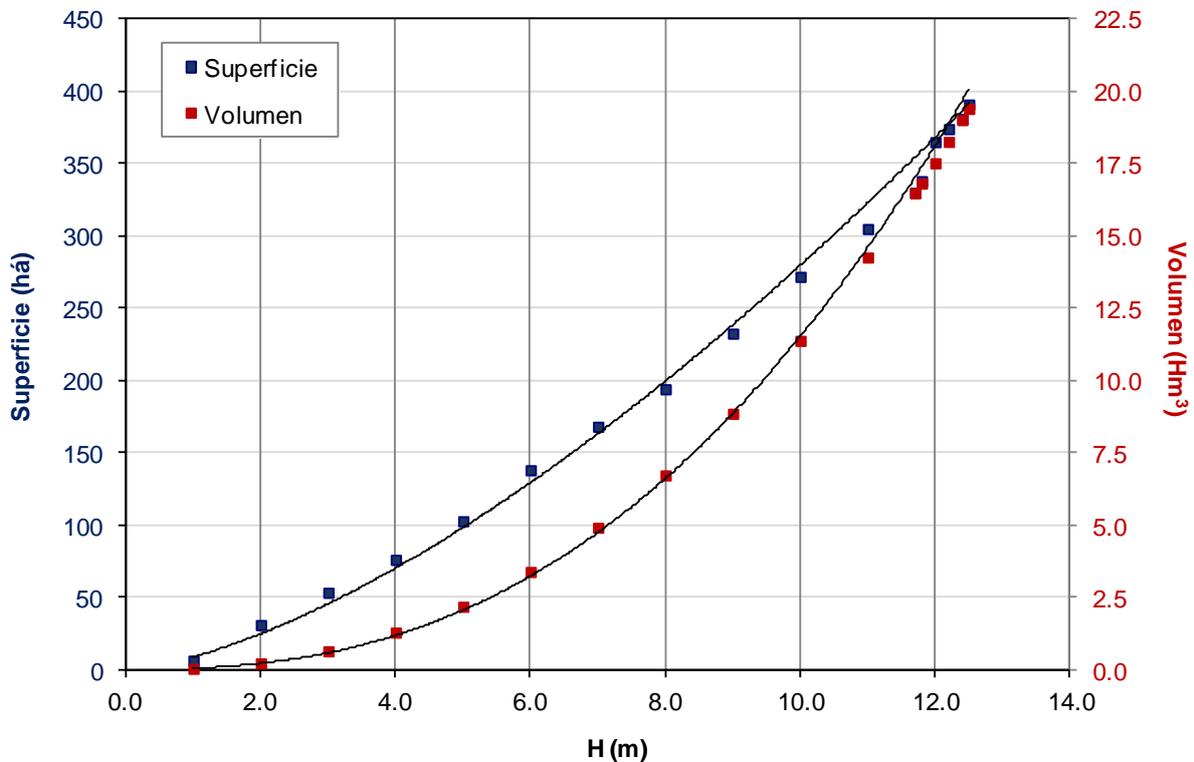


Figura 6: Ejemplo de curvas cota-superficie-volumen (H-A-V) del embalse.

## 2.2. Procedimiento de cálculo

A continuación, se describen los pasos a seguir para el cálculo del balance al embalse, mes a mes, y en la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo correspondiente. Cabe destacar que dicho procedimiento es un proceso iterativo. En contraste con los métodos directos, un método iterativo trata de resolver un problema matemático mediante aproximaciones sucesivas a la solución, empezando desde una estimación inicial. Los métodos iterativos son útiles para resolver problemas implícitos (como es el caso) o que involucran un número grande de variables.

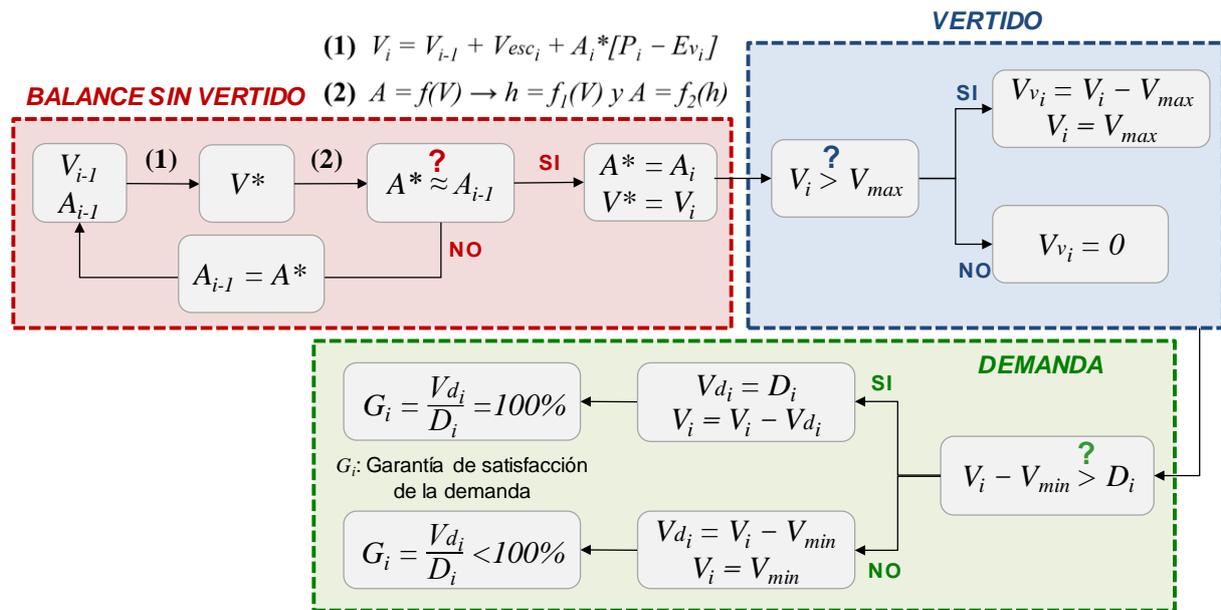
La ecuación de balance en el embalse (\*) tiene mes a mes tres incógnitas (resaltadas en rojo): el nivel final del agua en el embalse, y su correspondiente volumen ( $V_i$ ) y área embalsada ( $A_i$ ), y el volumen de vertido ( $V_{vi}$ ).

$$\Delta V_{emb} = V_{esc} + P \cdot A_{emb} - E_v \cdot A_{emb} - \underbrace{V_{mf}}_{\approx 0} - V_d - V_v$$

$$\Delta V_{emb} = V_i - V_{i-1}$$

$$V_i = V_{i-1} + V_{esc_i} + A_i \cdot [P_i - E_{v_i}] - V_{d_i} - V_{v_i}$$

El volumen de demanda ( $V_{di}$ ) se define en función de la disponibilidad de agua, una vez descontado el vertido.



**Figura 7: Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo del balance al embalse mes a mes (proceso iterativo).**

**Balance sin vertido**

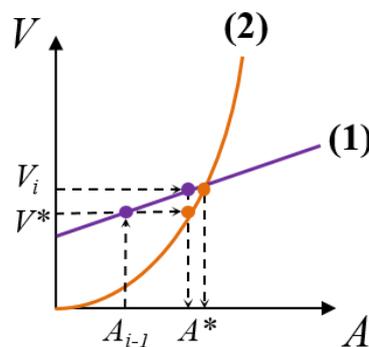
Para iniciar la iteración se recomienda asumir que inicialmente la cota de vertido es suficientemente grande como para que el volumen de vertido sea cero ( $V_{v_i} = 0$ ).

En esas condiciones, y junto con las curvas H-A-V del embalse, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones con dos incógnitas ( $V_i$  y  $A_i$ ), que se representa gráficamente en la Figura 8:

(1)  $V_i = V_{i-1} + V_{esc_i} + A_i * [P_i - Ev_i]$

(2)  $A = f(V) \rightarrow h = f_1(V)$  y  $A = f_2(h)$

Se recuerda que el volumen de demanda se define en función de la disponibilidad de agua, una vez descontado el vertido, por lo que inicialmente podrá asumirse como nulo ( $V_{d_i} = 0$ ).



**Figura 8: Representación gráfica del sistema de ecuaciones a resolver en el balance al embalse sin vertido.**

Entonces, conocido el volumen del embalse en el mes anterior ( $V_{i-1}$ ) y tomando como valor inicial para el área inundada en el mes actual ( $A_i$ ) la correspondiente al mes anterior ( $A_{i-1}$ ),

mediante la ecuación **(1)** se puede determinar el volumen final del embalse para el mes en cuestión ( $V^*$ ).

A partir de dicho volumen, aplicando las relaciones entre las curvas H-A-V según la ecuación **(2)** se determina el valor del área inundada correspondiente ( $A^*$ ) y se lo compara con el valor inicial considerado ( $A_{i-1}$ ).

Si ambos valores de área no coinciden (para ello previamente se debe definir una tolerancia para el error), se repite el procedimiento tomando ahora como valor inicial  $A^*$ .

Si ambos valores coinciden (su diferencia es menor a la tolerancia adoptada), se llegó a la solución del sistema:  $A_i = A^*$  y  $V_i = V^*$ .

### **Evaluación del vertido**

Luego se debe comparar el volumen obtenido ( $V_i$ ) con el volumen correspondiente a la cota de vertido ( $V_{\max} = V(H_v)$ ).

Si este último es mayor, entonces la hipótesis de “no-vertido” es correcta y el volumen del embalse calculado anteriormente es el correcto, continuando con el cálculo para el mes siguiente.

Si el volumen del embalse ( $V_i$ ) resulta mayor que el volumen a cota de vertido ( $V_{\max}$ ), es necesario corregir el volumen del embalse por el volumen a cota de vertido y calcular el volumen vertido como la diferencia entre el volumen del embalse inicialmente calculado y el volumen a cota de vertido:  $V_{v_i} = V_i - V_{\max}$  y  $V_i = V_{\max}$ .

### **Evaluación de satisfacción de la demanda**

Se calcula mes a mes el volumen útil disponible en el embalse ( $V_{d_i} = V_i - V_{\min}$ ,  $V_{\min} = V(H_t)$ ) para cubrir la demanda ( $D_i$ ), y se realiza un análisis del cumplimiento.

A partir de los volúmenes que resulten disponibles se define la garantía de satisfacción de la demanda según:

$$G_i = \frac{V_{d_i}}{D_i}$$

Si  $V_{d_i} = D_i$ , es decir que se logra cubrir toda la demanda del mes, entonces  $G_i = 100\%$ . En caso contrario,  $G_i < 100\%$ .

**Análisis estadístico:** El grado de satisfacción de la demanda se analiza estadísticamente por el nivel de cumplimiento de la misma durante el período en que se realiza el balance hídrico mensual en el embalse, caracterizado éste por sus cotas de toma ( $H_t$ ) y de vertido ( $H_v$ ).

**Análisis de factibilidad/Optimización:** Cambiando las características de la obra, en particular la cota de vertido, es posible contrastar los beneficios asociados a la oferta de agua (por ejemplo, posibilidad de ampliar el área regada) con el costo de la obra, conociendo el riesgo de satisfacción de la demanda en cada alternativa.

**Comentario**

Si el área máxima inundada del embalse es significativamente inferior al área de la cuenca de aporte al mismo ( $A_{\max} \ll A_c$ ), es posible resolver el modelo de Temez y el balance hídrico al embalse de manera independiente y secuencial (asumir los escurrimientos según Temez como un dato de entrada para el balance del embalse). De esta manera, estamos despreciando el error introducido al considerar dos veces la precipitación sobre la superficie del embalse, en Temez y en el balance.

En caso contrario, si el área máxima inundada del embalse es del orden del área de la cuenca de aporte al mismo ( $A_{\max} \approx A_c$ ), en cada paso de tiempo (mes), hay que calcular el volumen de escorrentía que llega al embalse corrigiendo el área de la cuenca, restando el área inundada por el embalse, y luego resolver el balance:

$$A_c(i) = A_c - A_{\text{emb}}(i) \Rightarrow V_{\text{esc}}(i) \Rightarrow V_{\text{emb}}(i)$$

Es decir, en este caso no es posible estimar una serie de aportes independiente, sino que hay que calcular el aporte de Temez teniendo en cuenta el peso de la superficie no inundada por el embalse en cada mes (de manera de evitar una sobreestimación del recurso disponible).

### 2.3. Datos necesarios

A continuación, se resumen los datos necesarios para la aplicación del modelo de balance hídrico en embalses:

- P: Precipitación en el embalse.
- Ev: Ciclo anual medio de evaporación de tanque A.
- Vesc: Escorrentía en la cuenca de aporte al embalse (Modelo de Temez).
- Ac: Área de la cuenca de aporte al embalse.
- Curvas de demanda a satisfacer (ciclos anuales), incluido el caudal ambiental.
- Curvas H-A-V del embalse:  $A = f(H)$  y  $V = f(H)$ .

### **3. BIBLIOGRAFÍA**

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. (1994). "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill. ISBN: 958-600-171-7.

MVOTMA-DINAGUA-IMFIA (2011). "Manual de diseño y construcción de pequeñas presas", Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-diseno-construccion-pequenas-presas>

MVOTMA (2017). "Plan Nacional de Aguas", Uruguay. ISBN: 978-9974-658-31-8. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/planes/plan-nacional-aguas>