

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Edición 2024

Alejandra De Vera

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

adevera@fing.edu.uy

BALANCE HÍDRICO EN CUERPOS DE AGUA

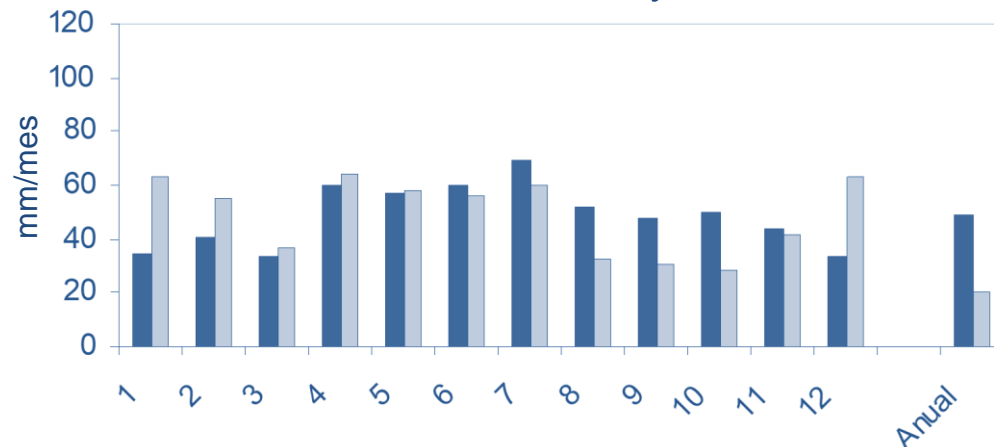
Objetivos

- ❖ 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.

EMBALSES EN URUGUAY

Motivación de construcción de embalses en Uruguay

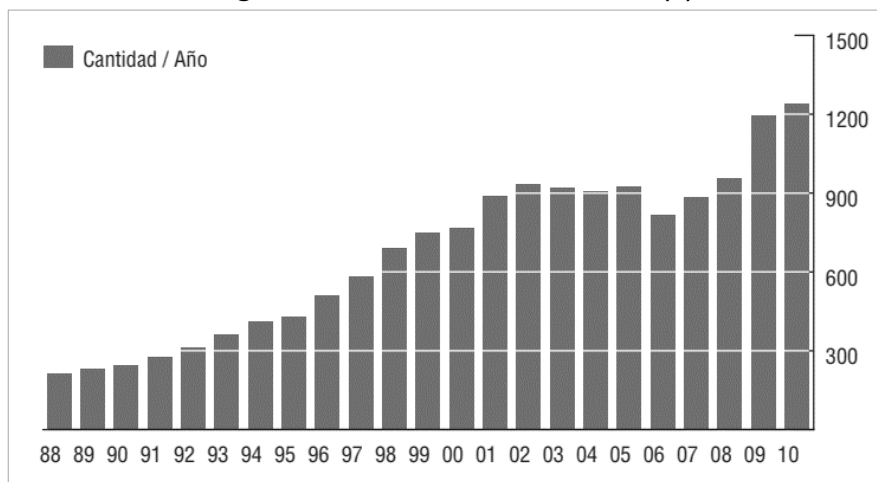
Ciclo medio anual de escorrentía y desviación estándar



Variabilidad mensual muy alta en comparación a la variabilidad anual



Evolución de embalses para riego en Uruguay según inventario DINAGUA (*)



Manejo de la disponibilidad del recurso en función de la demanda del mismo

(*) "Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas", MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011.

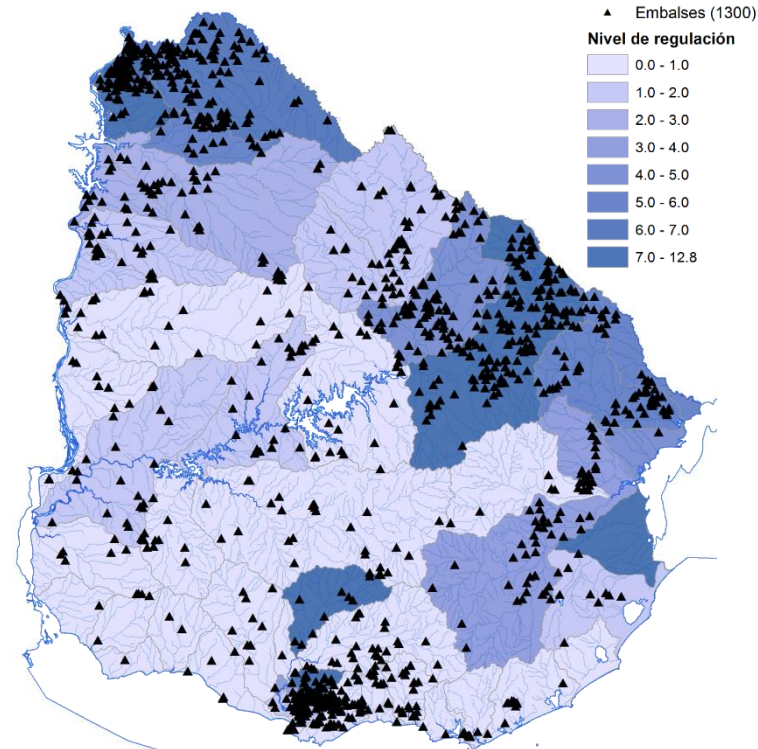
EMBALSES EN URUGUAY

$$\text{Nivel de regulación} = \frac{\text{Capacidad Total Embalses}}{\text{Esguerrimiento Medio Anual}}$$

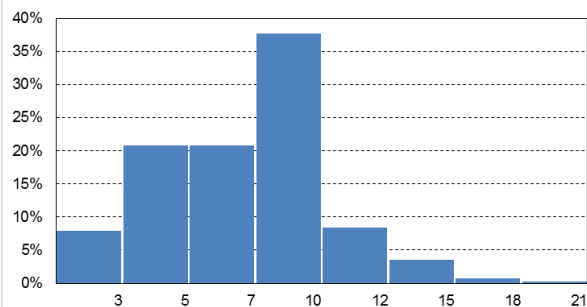
❖ 1300 embalses registrados al año 2012

Clasificación de embalses según DNH-MTOP H (m), A (ha), V (m³)

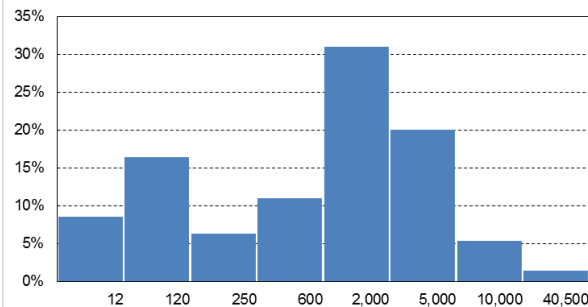
		A < 4	4 ≤ A < 40	40 ≤ A < 200	200 ≤ A < 500	500 ≤ A < 1000	1000 ≤ A < 5000	5000 ≤ A < 15000	A ≥ 15000
H < 3	V < 12.000 = Tajamar Chico								
	12.000 ≤ V < 120.000 = Tajamar Mediano								
	V ≥ 120.000 = Tajamar Grande								
3 ≤ H < 5	Tajamar Chico	Tajamar Mediano	Tajamar Grande	120.000 ≤ V < 600.000 = Represa Chica					
				V ≥ 600.000 = Represa Mediana					
5 ≤ H < 15	V < 120.000 = Tajamar Grande			Represa Chica	Represa Mediana	Represa Grande I	Represa Grande II		
H ≥ 15	V ≥ 120.000 = Represa Chica						Represa Grande II		



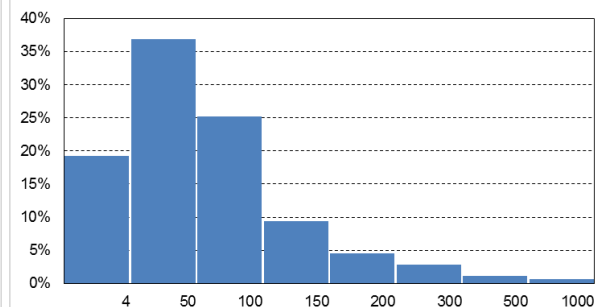
Hmax (m)



Vol Emb (mil m³)



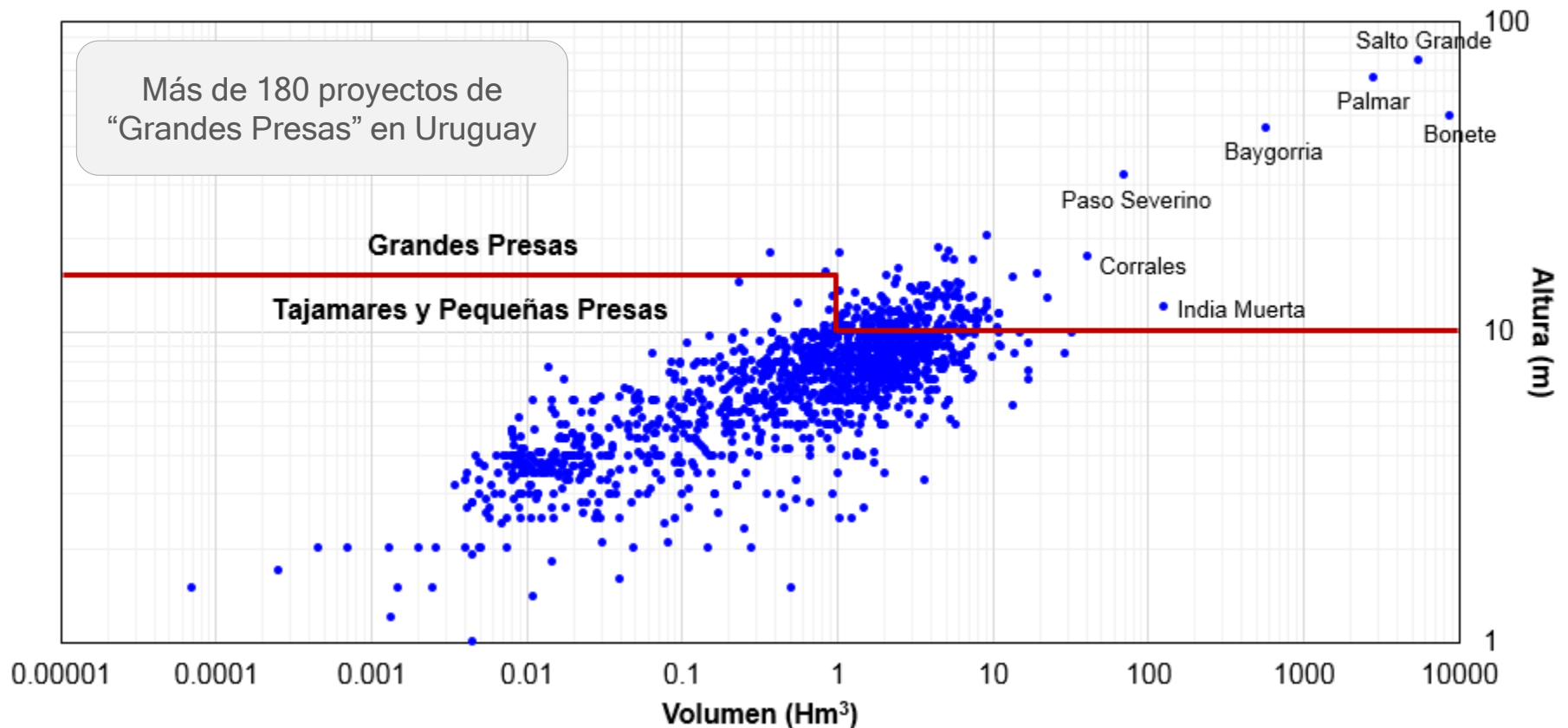
Lago (ha)



(*) Elaboración propia en base al Inventario DINAGUA 2012, sin incluir los embalses para generación hidroeléctrica ni Paso Severino.

EMBALSES EN URUGUAY

Altura y volumen de las presas uruguayas según los criterios del ICOLD (International Commission on Large Dams)



EMBALSES EN URUGUAY

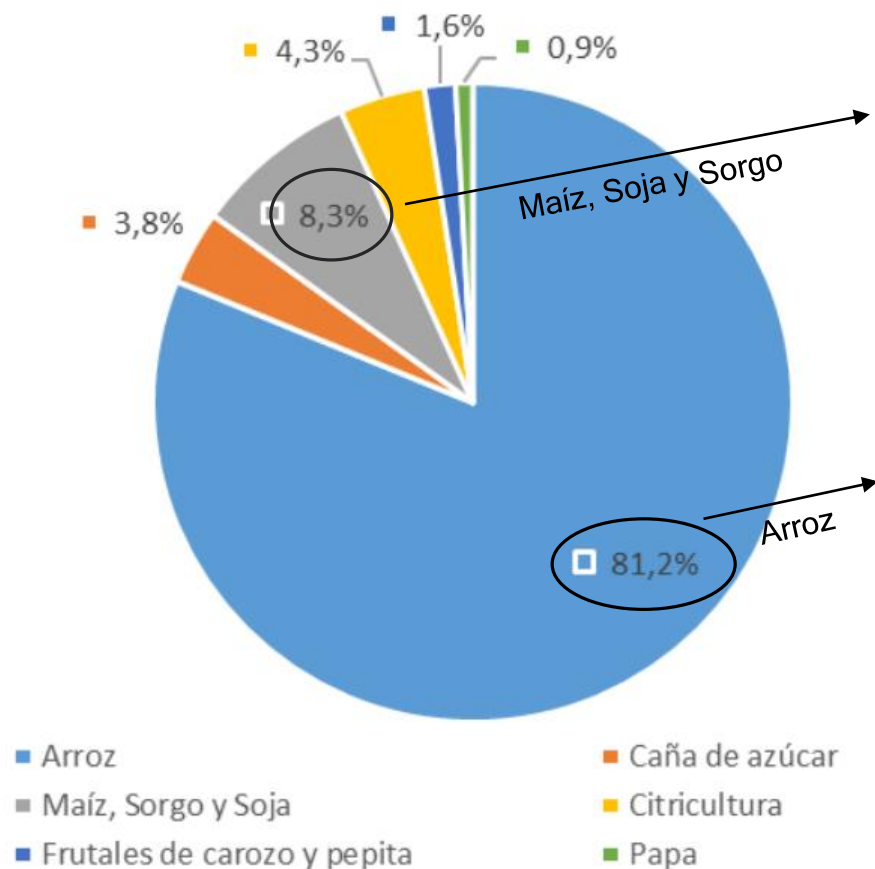
Presas de materiales sueltos



RIEGO EN URUGUAY

Casi el 80% del volumen de extracción anual de agua (aprovechamientos) se destina al riego

Distribución de la superficie regada por cultivo y por fuente (Zafra 2016/17)



Cuadro 9. Superficie regada total y por cultivo, según fuente de agua

Cultivo	Pozo	Represa	Cauce
TOTAL	2.772	13.003	8.398
Soja	1.810	7.543	4323
Maíz	962	5352	3790
Sorgo	0	108	285

Fuente: MGAP – DIEA encuesta Agrícola 2018

(54%)

Cuadro 5: Superficie regada de arroz según fuente de agua y zona de producción. Zafra 2016/17

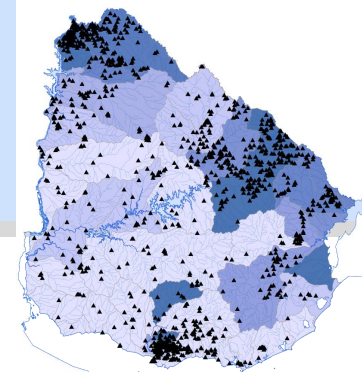
Zona de producción	Superficie regada (miles de ha)		
	Total	Represa	Cauce
TOTAL	164,4	90,4	74,0
Este	118,4	51,0	66,4
Norte - Litoral Oeste	33,4	27,4	6,0
Centro	12,6	11,0	1,6

Fuente: MGAP – DIEA Encuesta Arroz zafra 2016/17

(55%)

(*) "Informe sobre Riego en Uruguay". DIEA-MGAP, 2018: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe_riego_en_uruguay_1.pdf

RIEGO EN URUGUAY



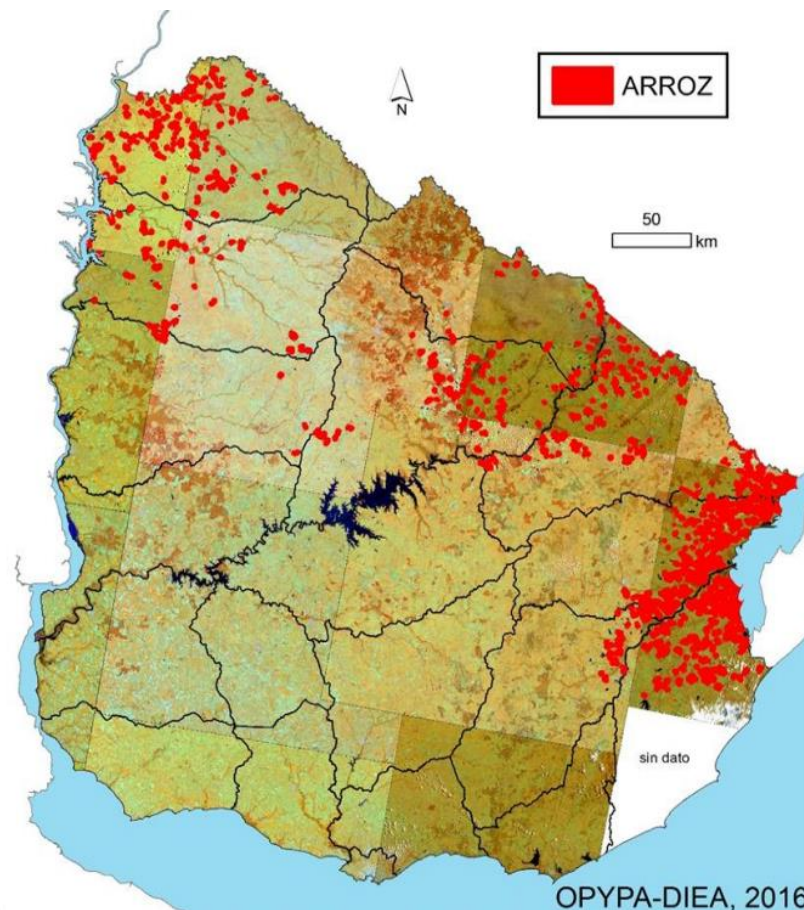
Principales cultivos bajo riego en Uruguay Arroz

Cuadro 5: Superficie regada de arroz según fuente de agua y zona de producción. Zafra 2016/17

Zona de producción	Superficie regada (miles de ha)		
	Total	Represa	Cauce
TOTAL	164,4	90,4	74,0
Este	118,4	51,0	66,4
Norte - Litoral Oeste	33,4	27,4	6,0
Centro	12,6	11,0	1,6

Fuente: MGAP – DIEA Encuesta Arroz zafra 2016/17

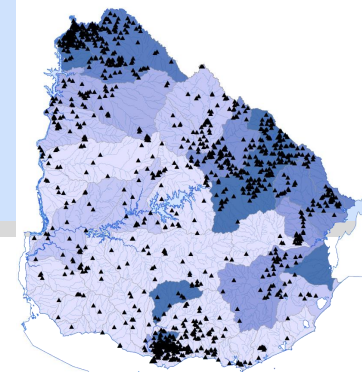
(55%)



Distribución espacial de las chacras de arroz (Zafra 2015/16)

(*) "Informe sobre Riego en Uruguay". DIEA-MGAP, 2018: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe_riego_en_uruguay_1.pdf

RIEGO EN URUGUAY



Principales cultivos bajo riego en Uruguay Cultivos cerealeros e industriales (Maíz, Sorgo y Soja)

Cuadro 8. Superficie sembrada total y bajo riego por cultivo. Zafra 2017/18

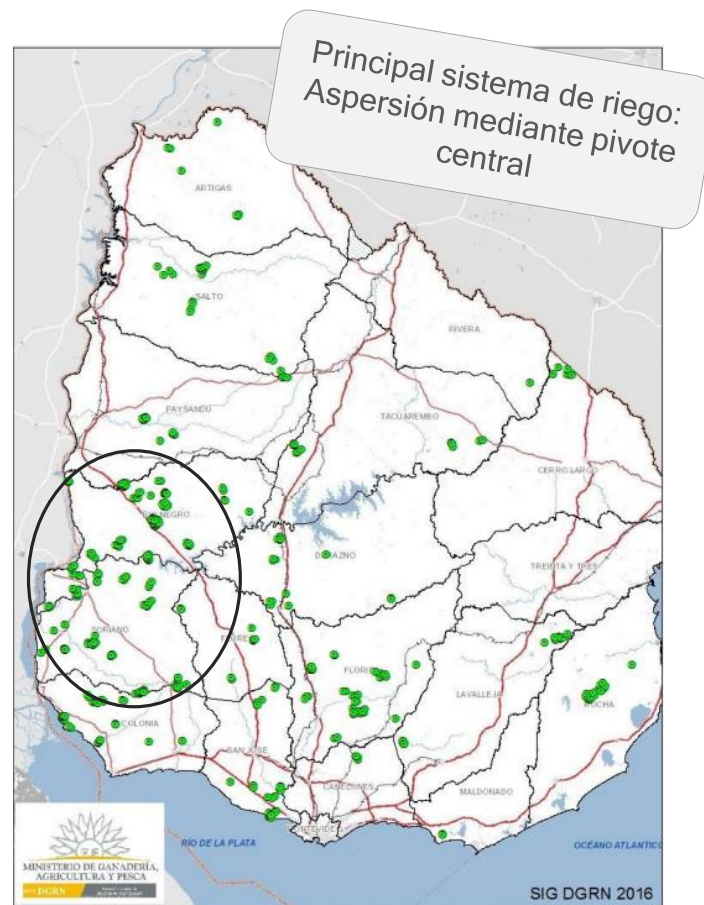
Cultivos	Total superficie sembrada (miles ha)	Superficie regada (ha)	%
TOTAL	1.198,6	24.171	2,0
Soja	1.098,6	13.675	1,2
Maíz	71,2	10.104	14,2
Sorgo	28,8	400	1,4

Fuente: MGAP – DIEA encuesta Agrícola 2018

Cuadro 9. Superficie regada total y por cultivo, según fuente de agua

Cultivo	Pozo	Represa	Cauce
TOTAL	2.772	13.003	8.398
Soja	1.810	7.543	4323
Maíz	962	5352	3790
Sorgo	0	108	285

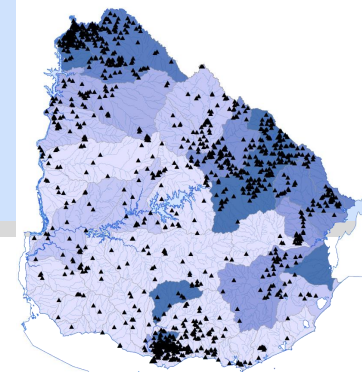
Fuente: MGAP – DIEA encuesta Agrícola 2018



Distribución espacial de los 411 pivotes activos (Zafra 2015/16)

(*) "Informe sobre Riego en Uruguay". DIEA-MGAP, 2018: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe_riego_en_uruguay_1.pdf

RIEGO EN URUGUAY



Principales cultivos bajo riego en Uruguay Cultivos cerealeros e industriales (Maíz, Sorgo y Soja)

Cuadro 8. Superficie sembrada total y bajo riego por cultivo. Zafra 2017/18

Cultivos	Total superficie sembrada (miles ha)	Superficie regada (ha)	%
TOTAL	1.198,6	24.171	2,0
Soja	1.098,6	13.675	1,2

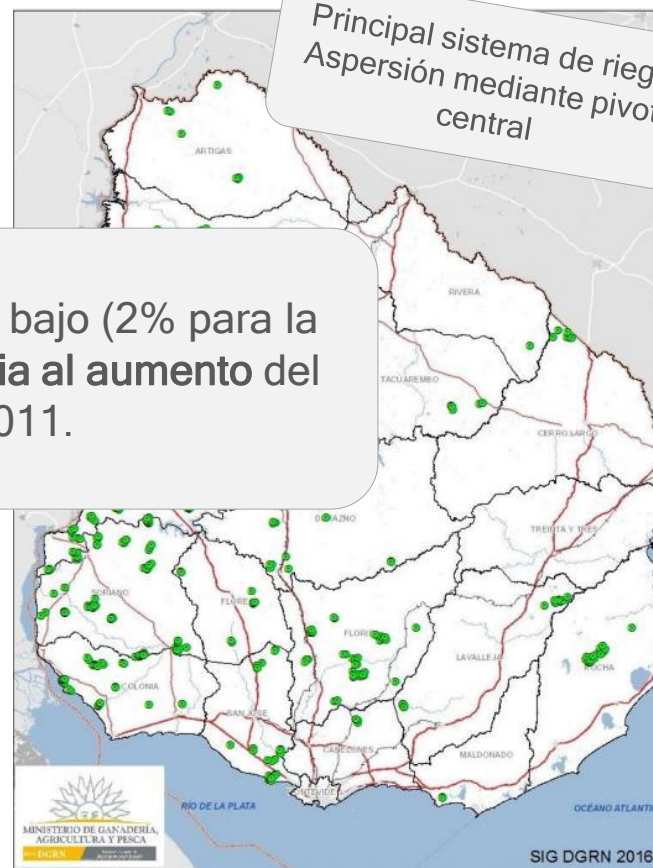
Maíz 71
Sorgo 2
Fuente: MGAP – DIEA

Si bien el porcentaje de área regada es bajo (2% para la zafra 2017/18), se registra una **tendencia al aumento del área bajo riego desde el 2011.**

Cuadro

Cultivo	Total superficie sembrada (miles ha)	Superficie regada (ha)	%
TOTAL	2.172	13.003	6.398
Soja	1.810	7.543	4323
Maíz	962	5352	3790
Sorgo	0	108	285

Fuente: MGAP – DIEA encuesta Agrícola 2018



Distribución espacial de los 411 pivotes activos (Zafra 2015/16)

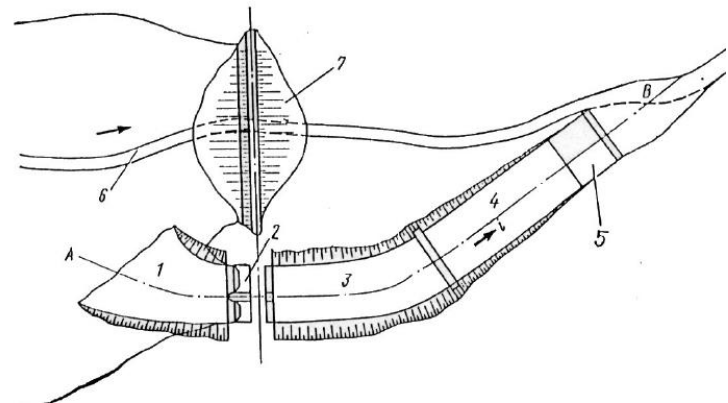
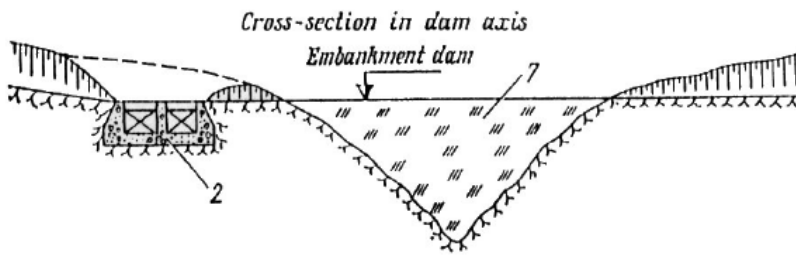
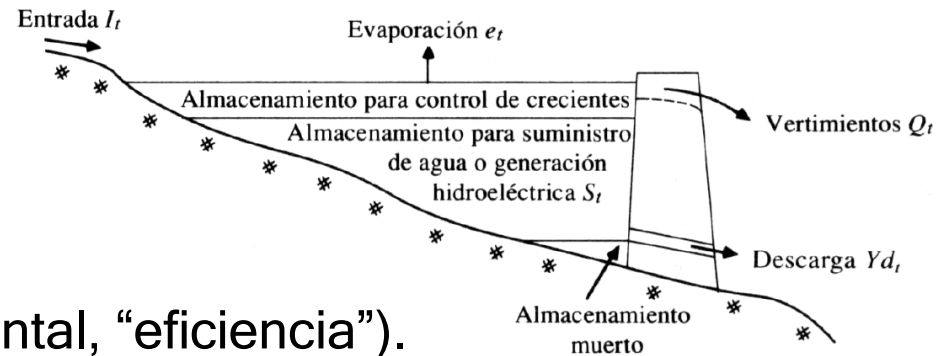


(*) "Informe sobre Riego en Uruguay". DIEA-MGAP, 2018: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe_riego_en_uruguay_1.pdf

DISEÑO DE UN EMBALSE

Aspectos a definir:

- ❖ Propósito (único o múltiples).
- ❖ Demanda de agua a satisfacer.
- ❖ Selección del sitio (aptitud ambiental, “eficiencia”).
- ❖ Altura y capacidad del embalse (curvas HAV).
- ❖ Cota, capacidad y geometría del vertedero.
- ❖ Cota y capacidad de las estructuras de descarga/obra de toma.

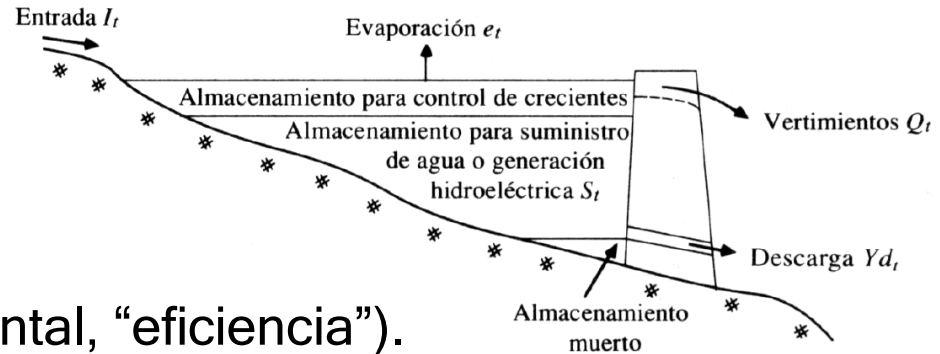


Presas de materiales sueltos: Vertedero tipo canal excavado

DISEÑO DE UN EMBALSE

Aspectos a definir:

- ❖ Propósito (único o múltiples).
- ❖ Demanda de agua a satisfacer.
- ❖ Selección del sitio (aptitud ambiental, “eficiencia”).
- ❖ Altura y capacidad del embalse (curvas HAV).
- ❖ Cota, capacidad y geometría del vertedero.
- ❖ Cota y capacidad de las estructuras de descarga/obra de toma.



Variables hidrológicas importantes:

- ❖ Disponibilidad de agua (volumen de escorrentía en la cuenca).
- ❖ Caudal ambiental (régimen hidrológico a preservar aguas abajo).
- ❖ Avenida de diseño para el vertedero (asociada a un determinado Tr).

DISEÑO DE UN EMBALSE

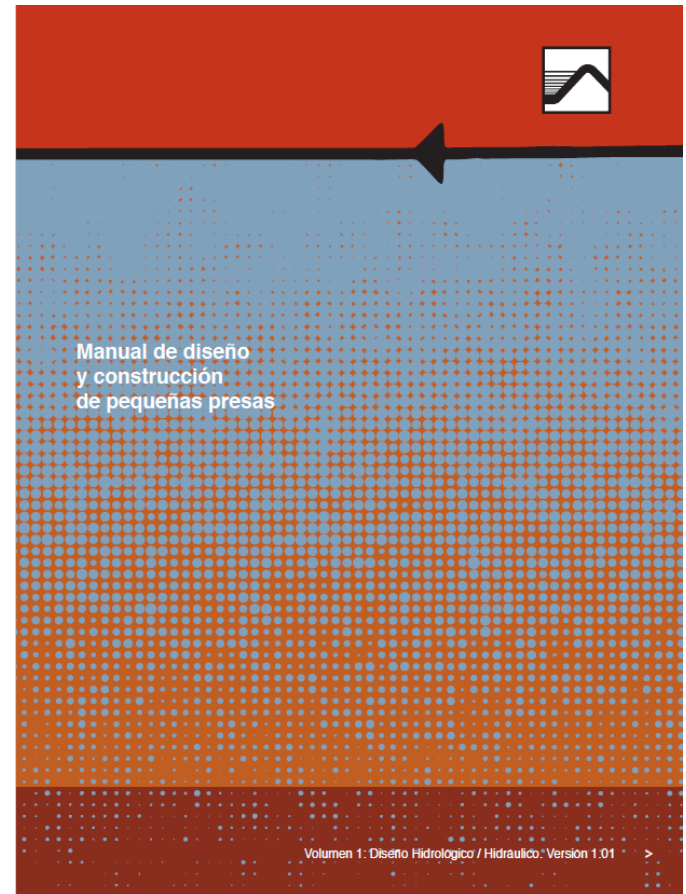
Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas:

MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011

- ❖ Publicado por la DINAGUA como entidad responsable de la gestión de los recursos hídricos.
- ❖ Guía de diseño para los represamientos hidráulicos, en particular con destino de riego.

Procedimiento administrativo:

- DINAGUA (Registro de la obra hidráulica)
- DINACEA (Si requiere AAP: 2 Hm³ y/o 100 ha)
- MGAP (Plan de uso del suelo)



DISEÑO DE UN EMBALSE

Caudal ambiental

- ❖ La infraestructura a construir deberá **respetar el caudal ambiental**.
- ❖ El caudal ambiental 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 la biodiversidad de los ecosistemas y el bienestar humano.
- ❖ No necesariamente consiste en fijar un único valor de caudal mínimo que debe ser mantenido en el río, sino que también debe considerarse la **variabilidad temporal en diversas escalas** (estacional, mensual, ...).

Ley de Riego y Decreto sobre Caudales Ambientales, Decreto 368/018:
Introduce este concepto y especifica cómo determinarlo

DISEÑO DE UN EMBALSE

Caudal ambiental

Ley de Riego y Decreto sobre Caudales Ambientales

Decreto 368/018

- ❖ **Determinación provisoria (Art. 5):** Mientras no sea realizada la determinación de los caudales ambientales según lo que refiere el artículo anterior:

Para las obras de embalses en **cursos de agua permanentes** se determinará un caudal ambiental **para cada mes del año** , en base a una estadística hidrológica de al menos 20 años de observaciones, correspondiente al caudal con **60% de probabilidad de excedencia** (frecuencia absoluta acumulada) en el mes correspondiente.

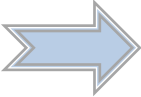
- ❖ Cuando para un curso de agua superficial determinado no exista la estadística hidrológica referida, el caudal ambiental se calculará utilizando un **modelo de balance hídrico** de precipitación-escorrentía.

DISEÑO DE UN EMBALSE

Pasos a seguir

DIMENSIONADO DEL VOLUMEN A EMBALSAR:

- ❖ Determinación de la localización de la presa.
- ❖ Determinación de las curvas de área superficial y capacidad de almacenamiento del embalse: $A = f_1(h)$, $V = f_2(h)$.
- ❖ Estimación de la demanda de agua a satisfacer.
- ❖ Evaluación de la disponibilidad de agua.
- ❖ Determinación de la elevación de la presa.
- ❖ Análisis del grado de satisfacción de la demanda:
¿El embalse cubre la demanda en forma adecuada?



Herramienta principal:
BALANCE HÍDRICO AL EMBALSE



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Balance hídrico

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

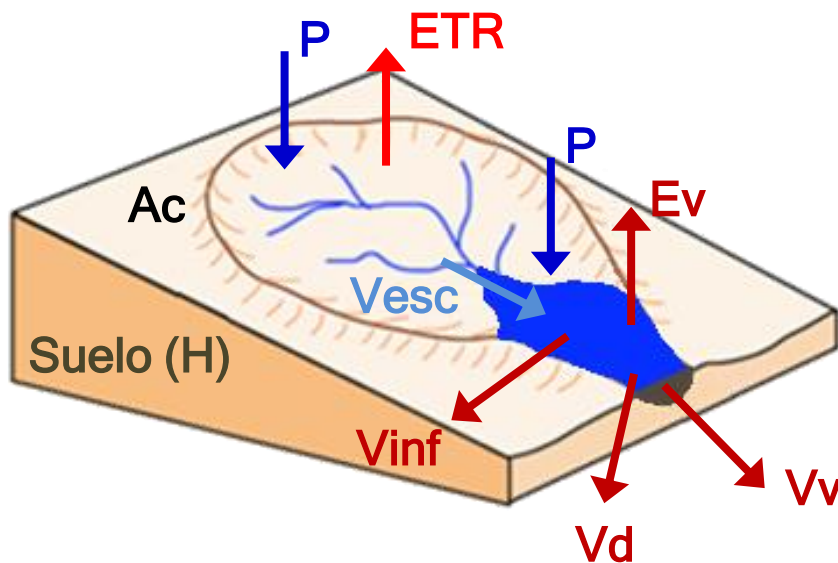
Se expresa a partir de la **ecuación de continuidad** aplicada a un **volumen de control** representativo del sistema:

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

donde $I(t)$ son los ingresos al sistema, $O(t)$ las salidas del sistema y S la variable de estado que representa el volumen de agua almacenada.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Variables a considerar



Vesc: Volumen de escorrentía (*)

P: Precipitación sobre el embalse

Ev: Evaporación del embalse

Vd: Volumen de demanda

Vv: Volumen vertido

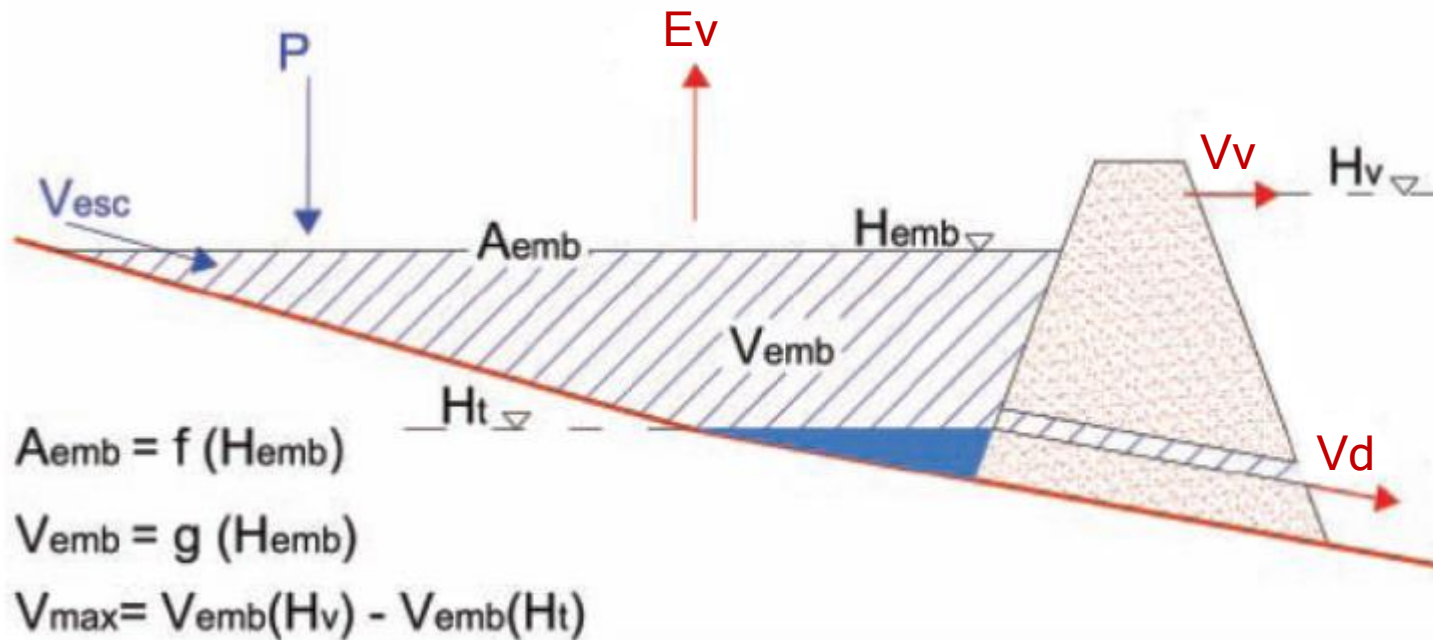
Vinf: Volumen de infiltración

Vemb: Volumen almacenado

(*) En cuencas no aforadas, el escurrimiento puede ser estimado mediante el modelo de Temez en función de (P, ETP, Ac, Hmax):

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

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



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

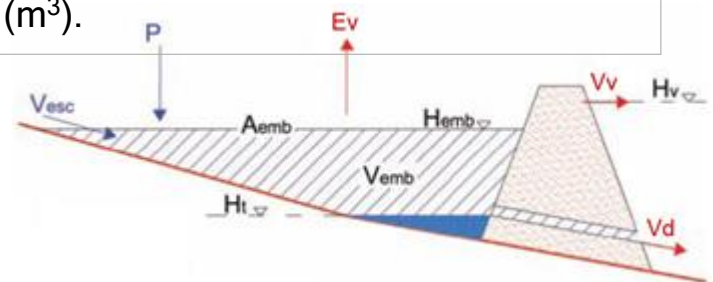
BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

$$\Delta V_{emb} = V_{esc} + P \cdot A_{emb} - E_v \cdot A_{emb} - \cancel{V_{inf}} - V_d - V_v$$

≈ 0

$\Delta V_{emb} = V_i - V_{i-1}$	Variación del volumen embalsado del mes $i-1$ al mes i (m ³).
A_{emb}	Área del embalse en el mes i (m ²).
V_{esc}	Volumen de escorrentía aportado por la cuenca en el mes i (m ³).
P	Precipitación sobre el embalse en el mes i (m).
$E_v = 0.70 \cdot E_{tanque}$	Evaporación sobre el embalse en el mes i (m).
V_{inf}	Volumen de infiltración en el mes i (m ³). Se considera despreciable.
V_d	Suma de volumen de demanda para todos los usos del embalse en el mes i (incluido el caudal ambiental) (m ³).
V_v	Volumen de vertido en el mes i (m ³).

Balance mensual y continuo en al menos 30 años



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

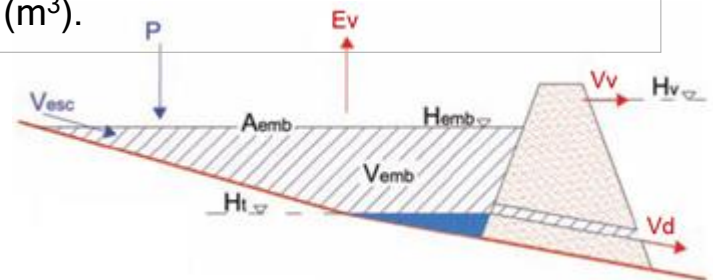
$$\Delta V_{emb} = V_{esc} + P \cdot A_{emb} - E_v \cdot A_{emb} - \cancel{V_{inf}} - V_d - V_v$$

≈ 0

$\Delta V_{emb} = V_i - V_{i-1}$	Variación del volumen embalsado del mes $i-1$ al mes i (m ³).
A_{emb}	Área del embalse en el mes i (m ²).
V_{esc}	Volumen de escorrentía aportado por la cuenca en el mes i (m ³).
P	Precipitación sobre el embalse en el mes i (m).
$E_v = 0.70 \cdot E_{tanque}$	Evaporación sobre el embalse en el mes i (m).
V_{inf}	Volumen de infiltración en el mes i (m ³). Se considera despreciable.
V_d	Suma de volumen de demanda para todos los usos del embalse en el mes i (incluido el caudal ambiental) (m ³).
V_v	Volumen de vertido en el mes i (m ³).



Cuidado con las unidades de cada término



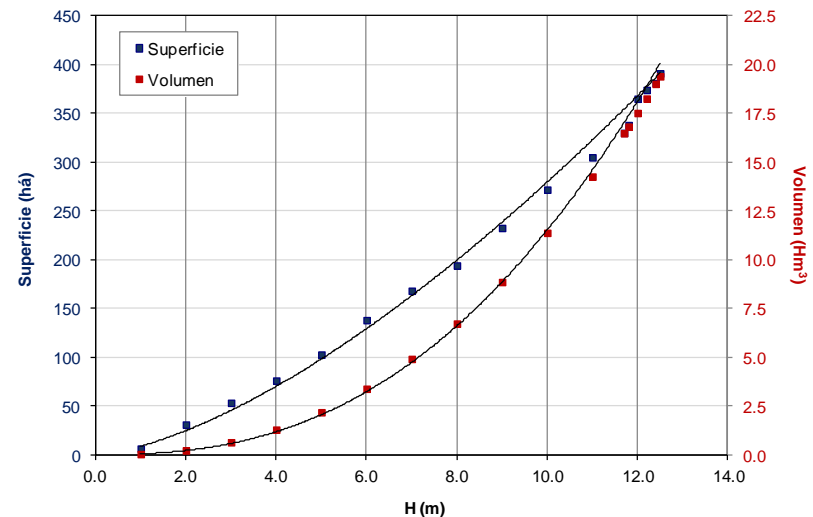
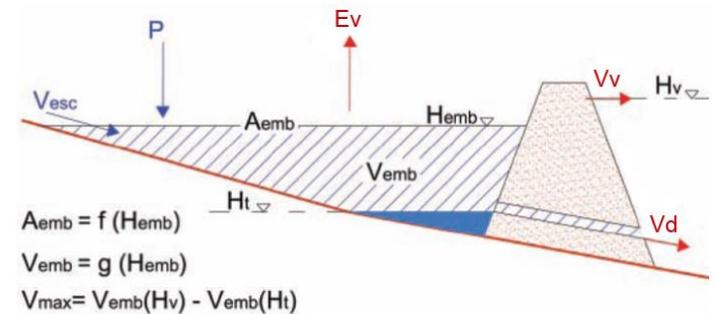
BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

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

≈ 0

Información necesaria:

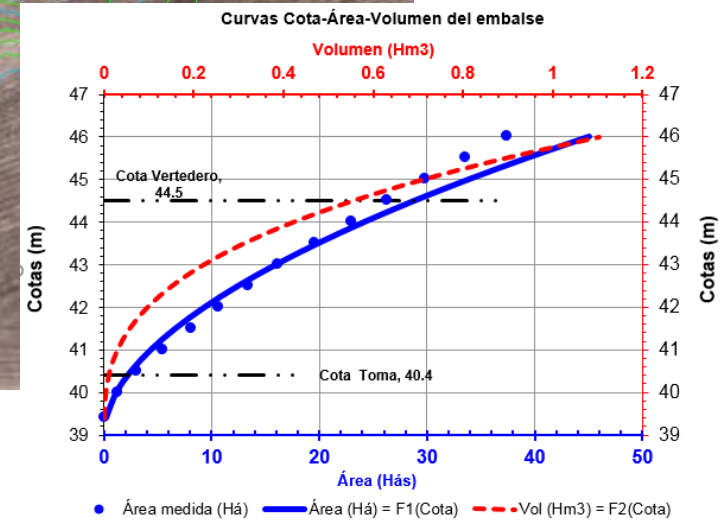
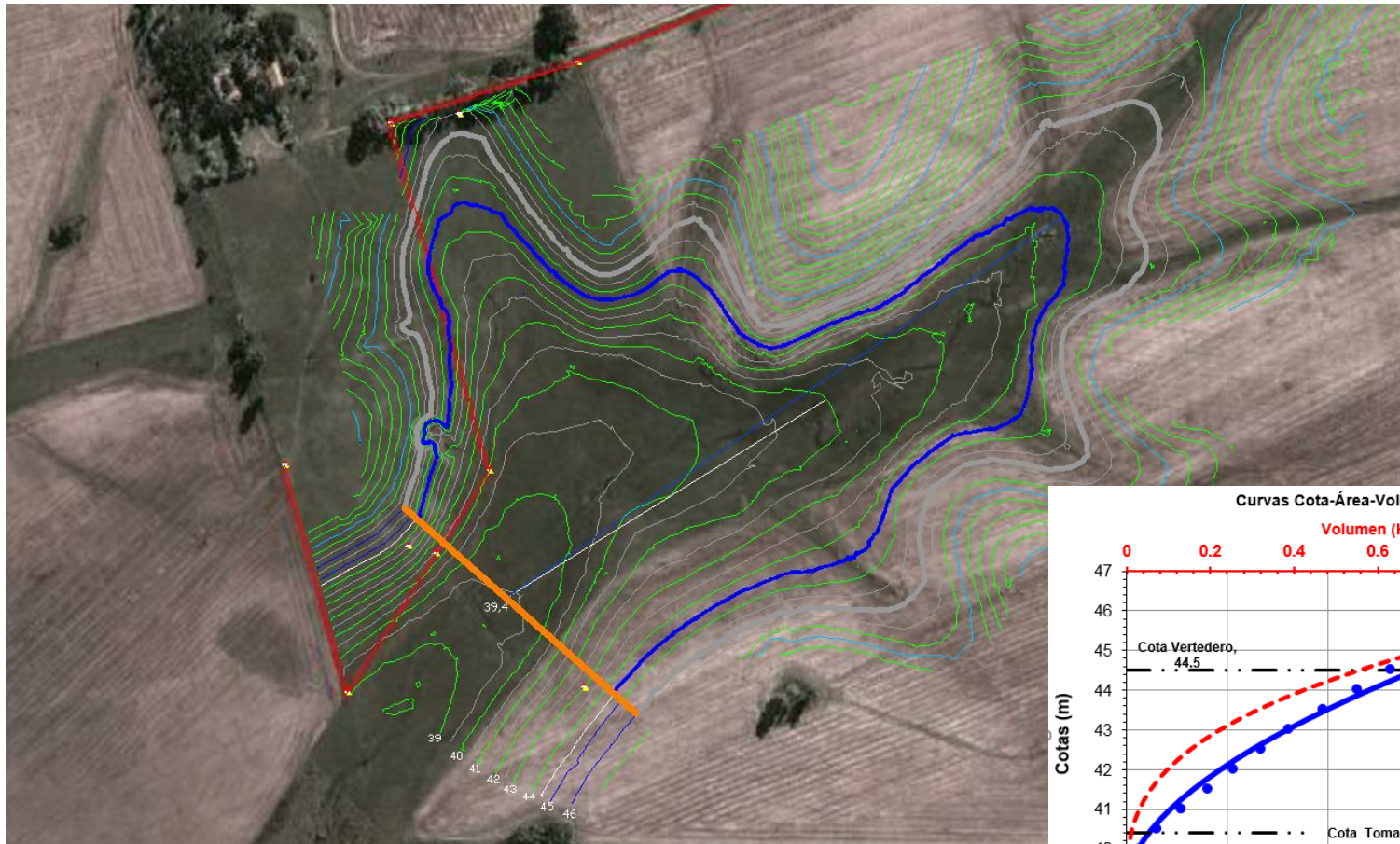
- ❖ Precipitación mensual
- ❖ Ciclo medio de evaporación de tanque A
- ❖ Escorrentía de la cuenca (Temez)
- ❖ Curvas de demanda (ciclos anuales)
- ❖ Curvas $A_{emb} = f(H_{emb})$ y $V_{emb} = f(H_{emb})$



Obs: La curva de almacenamiento-área puede modificarse luego de su construcción debido a la sedimentación en el embalse.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

❖ Curvas $A_{emb} = f(H_{emb})$ y $V_{emb} = f(H_{emb})$



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Procedimiento de cálculo:

$$(1) \Delta V_{emb} = V_{esc} + P.A_{emb} - E_v.A_{emb} - \cancel{V_{inf}} - V_d - V_v$$

≈ 0

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

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

≈ 0

Para iniciar la iteración se recomienda asumir que h_v es suficientemente grande, tal que $V_v = 0$.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Procedimiento de cálculo:

$$(1) \Delta V_{emb} = V_{esc} + P.A_{emb} - E_v.A_{emb} - \cancel{V_{inf}} - V_d - V_v$$

≈ 0

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

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

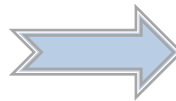
≈ 0

Balance sin vertido:

En función de la
disponibilidad de agua

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

Tenemos 2 incógnitas



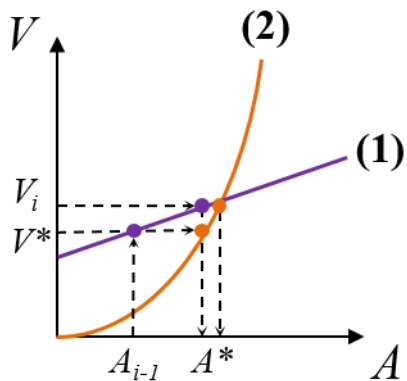
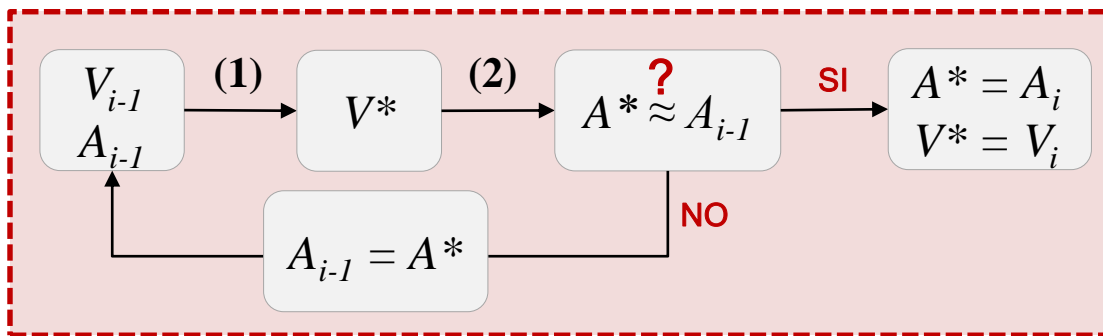
¿Otra ecuación?
(2) $A = f(V)$

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Procedimiento de cálculo:

- (1) $V_i = V_{i-1} + V_{esc_i} + A_i^*[P_i - E_{v_i}] - V_{d_i} - V_{v_i}$
- (2) $A = f(V) \rightarrow h = f_1(V)$ y $A = f_2(h)$
- $\swarrow \approx 0$ $\swarrow \approx 0$

BALANCE SIN VERTIDO



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

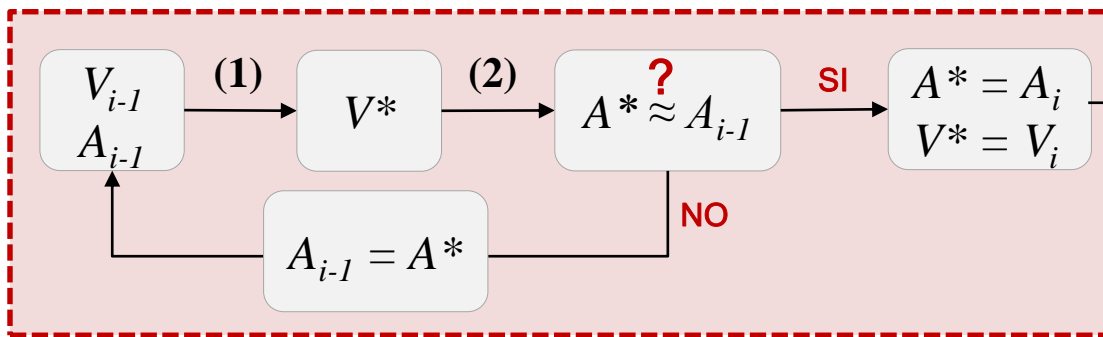
Procedimiento de cálculo:

- (1) $V_i = V_{i-1} + V_{esc_i} + A_i^*[P_i - E_{v_i}] - V_{d_i} - V_{v_i}$
- (2) $A = f(V) \rightarrow h = f_1(V)$ y $A = f_2(h)$

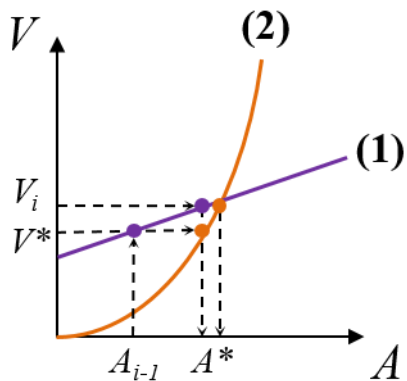
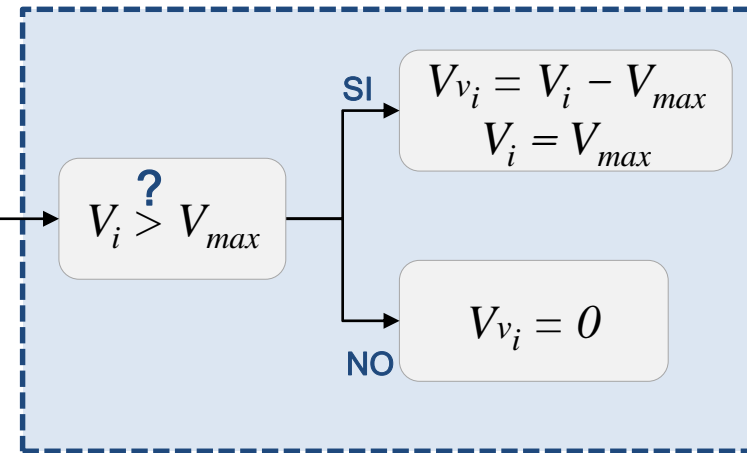
$$V_{min} = V(h_t)$$

$$V_{max} = V(h_v)$$

BALANCE SIN VERTIDO



VERTIDO



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Procedimiento de cálculo:

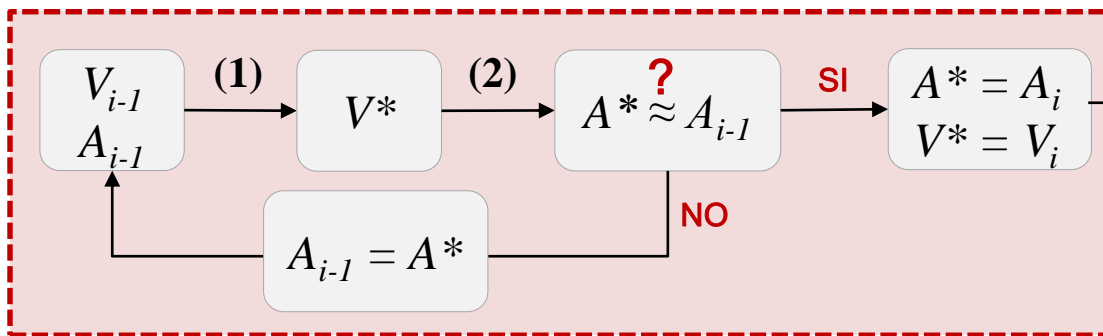
$$(1) V_i = V_{i-1} + V_{esc_i} + A_i * [P_i - E_{v_i}] - V_{d_i} - V_{v_i}$$

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

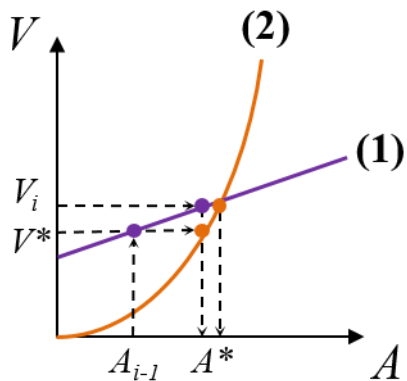
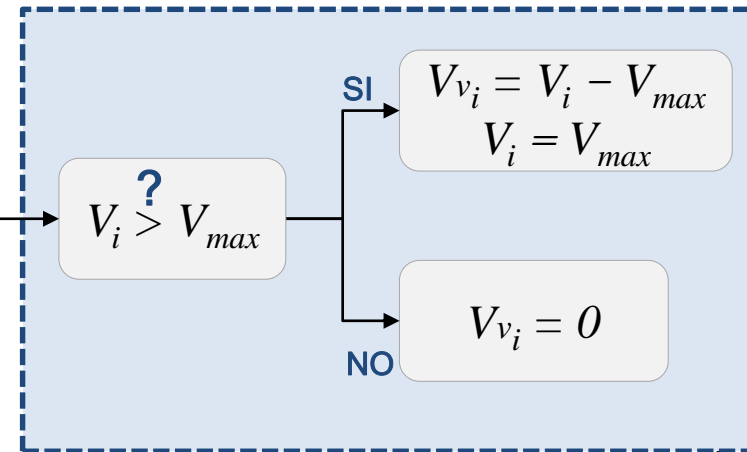
$$V_{min} = V(h_t)$$

$$V_{max} = V(h_v)$$

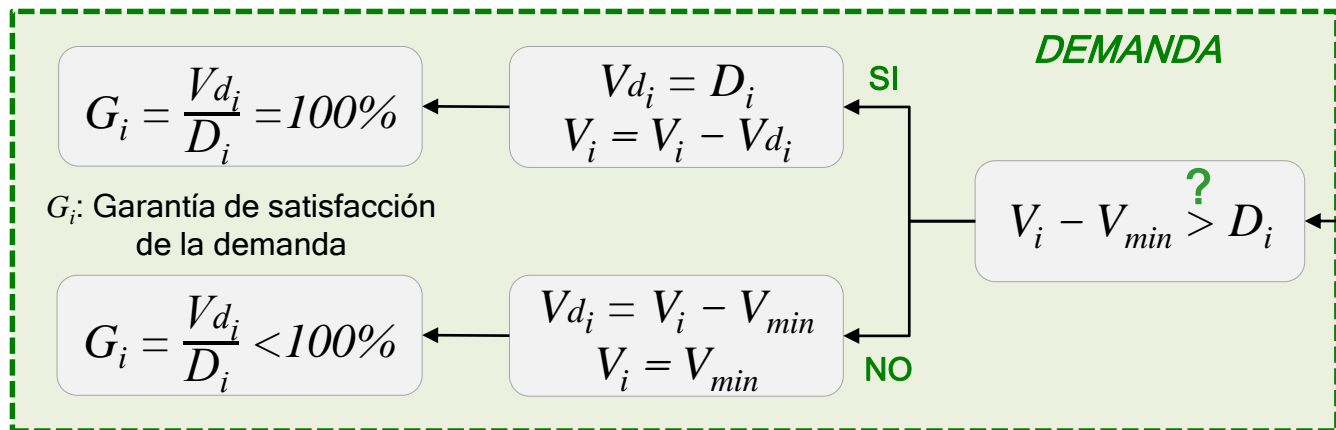
BALANCE SIN VERTIDO



VERTIDO



DEMANDA



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Satisfacción de la demanda:

Se calcula mes a mes el volumen útil disponible en el embalse (V_{d_i}) para cubrir la demanda (D_i) y se realiza un análisis del cumplimiento.

- ❖ **Análisis estadístico del grado de satisfacción de la demanda (G_i)** 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 h_v , es posible contrastar los beneficios asociados a la oferta de agua (por ejemplo, posibilidad de ampliar el área cultivada) con el costo de la obra, conociendo el riesgo de satisfacción de la demanda en cada alternativa.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

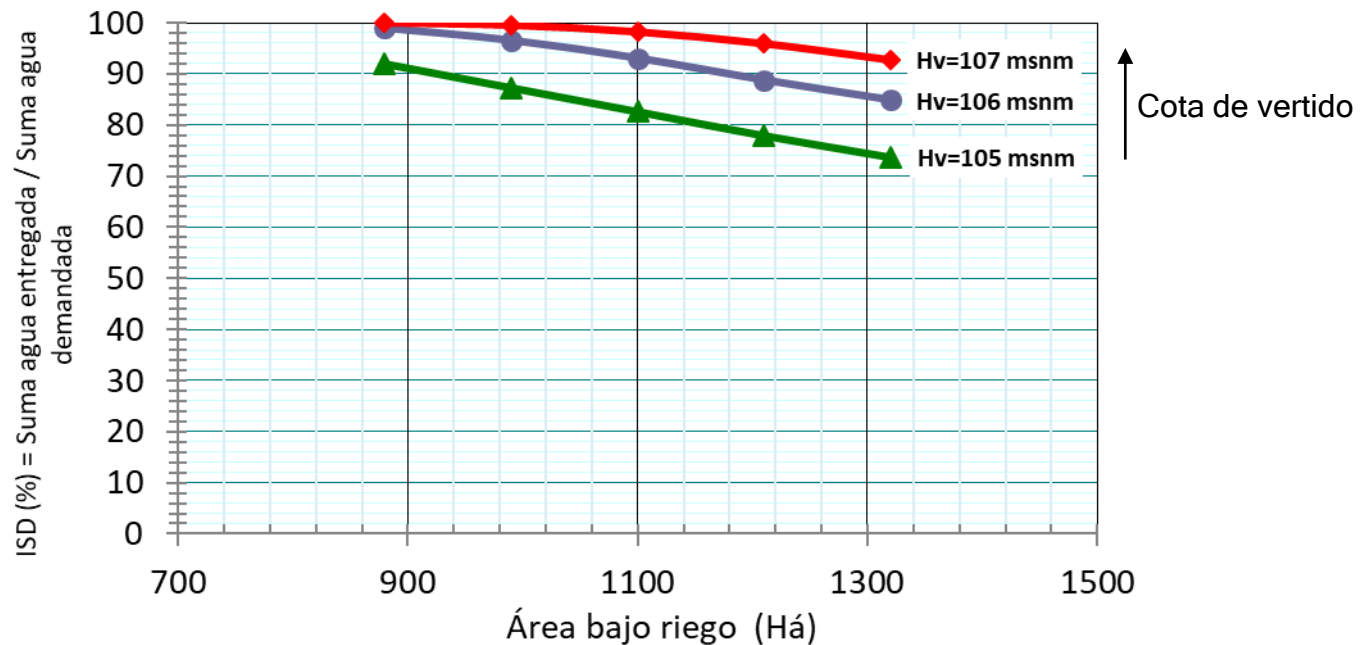
Ejemplo: Satisfacción de la demanda

Análisis de la Satisfacción de la Demanda

Según 2.2

Presas del Ejemplo del Manual

Para el siguiente valor de cota de la obra de Toma Ht:	100,5	msnm
los siguientes son los valores medios y los entornos a analizar:		
Cota de vertido Hv:	106	msnm
en un entorno de	1	m en más y en menos
Área media a regar (Ar) c/demanda unitaria vdi:	1100	Hás
en un entorno de un	20	% en más y en menos

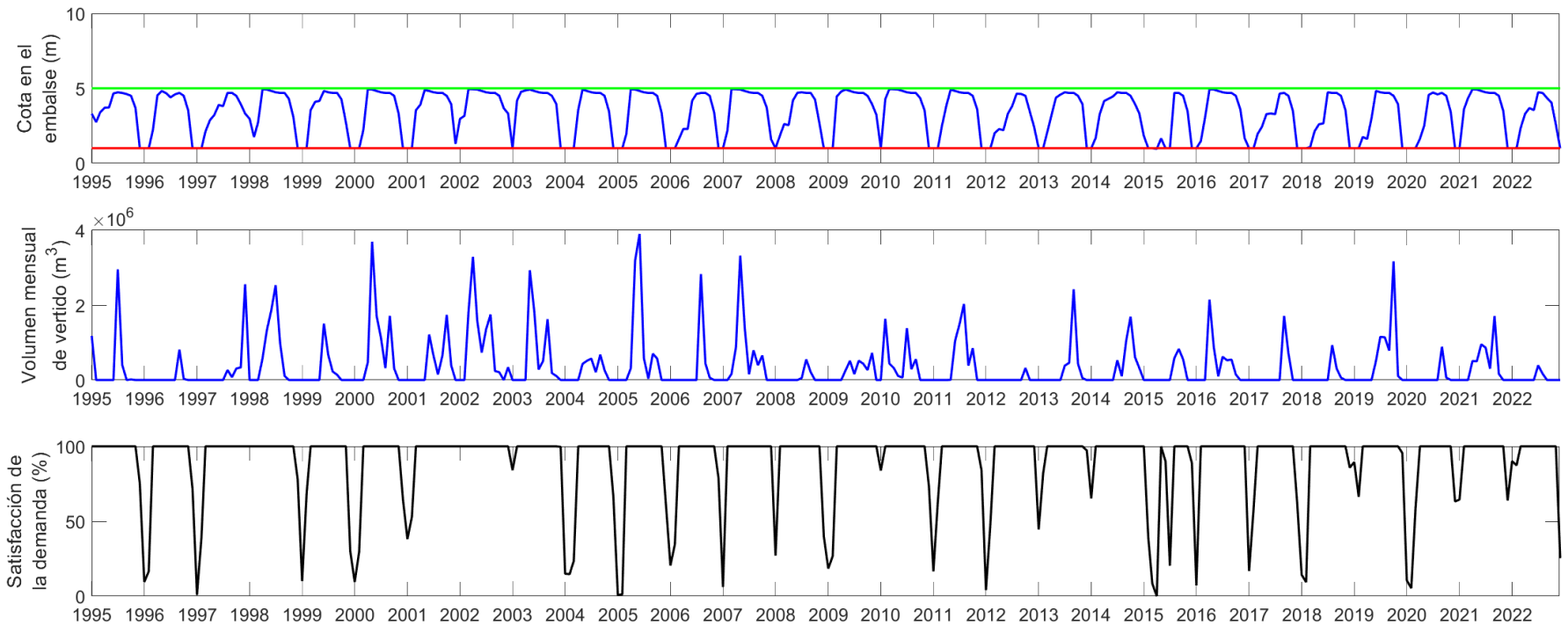


(*) Ejemplo de la planilla del “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas”, MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo: Satisfacción de la demanda

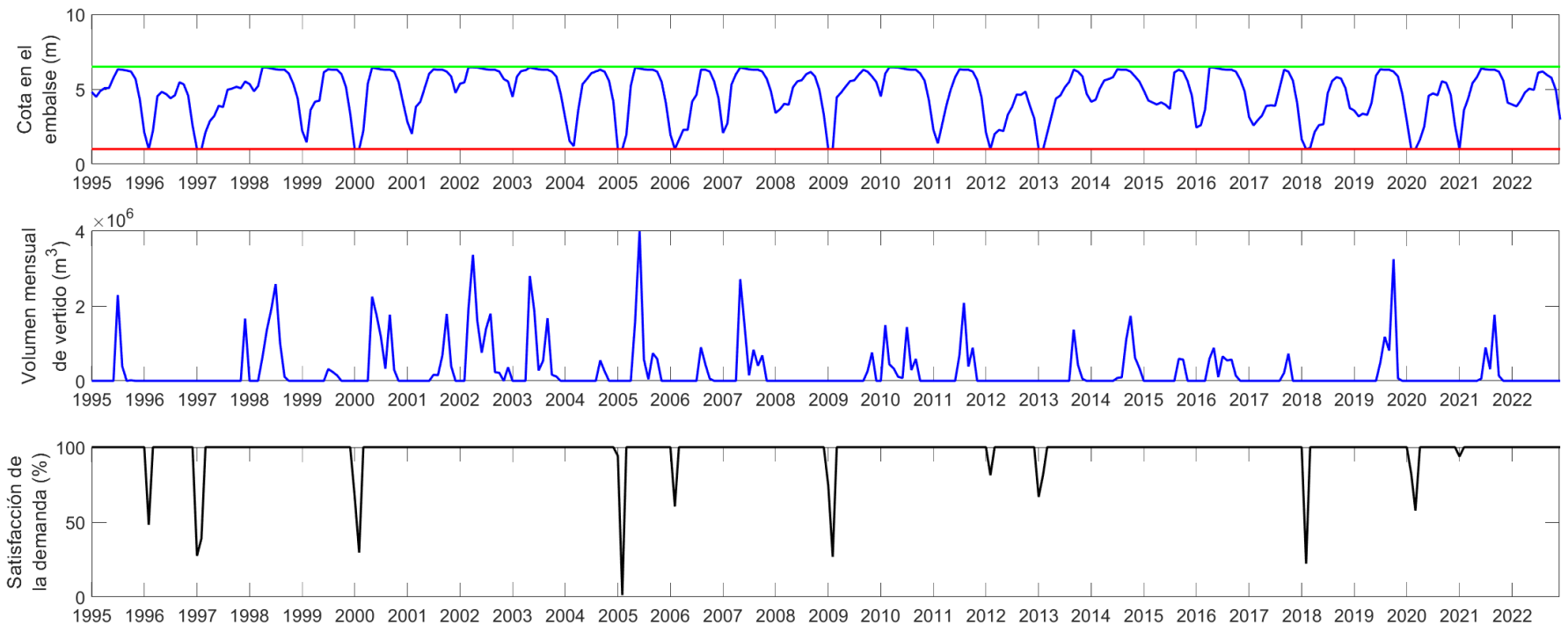
❖ Evolución durante el periodo simulado: $H_v = 5 \text{ m}$



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo: Satisfacción de la demanda

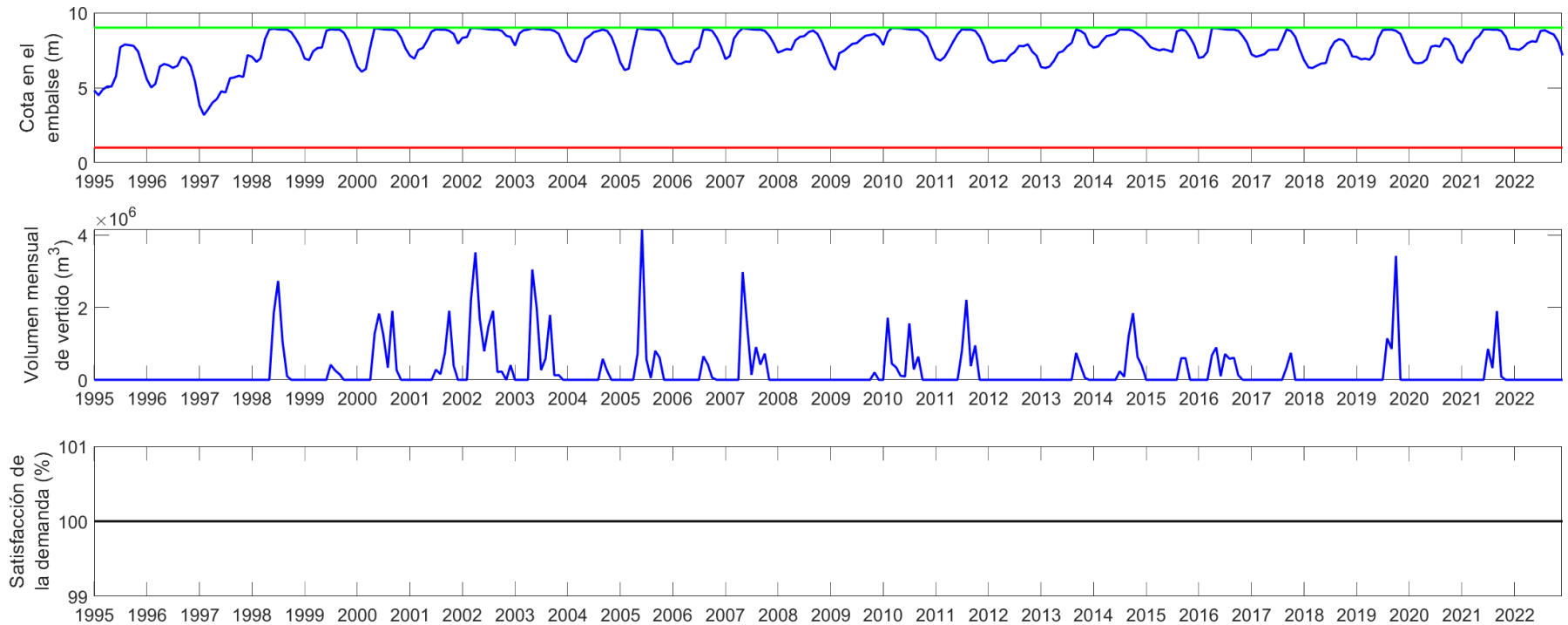
❖ Evolución durante el periodo simulado: $H_v = 6,5$ m (se mantiene la demanda)



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo: Satisfacción de la demanda

❖ Evolución durante el periodo simulado: $H_v = 9$ m (se mantiene la demanda)



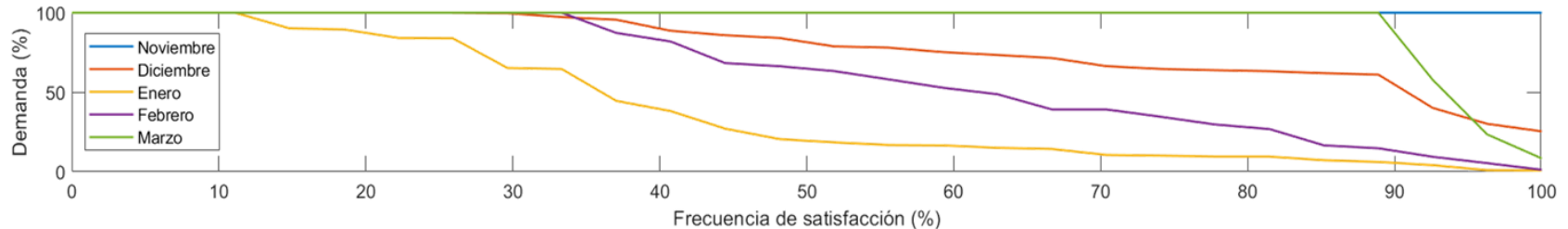
BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo: Satisfacción de la demanda

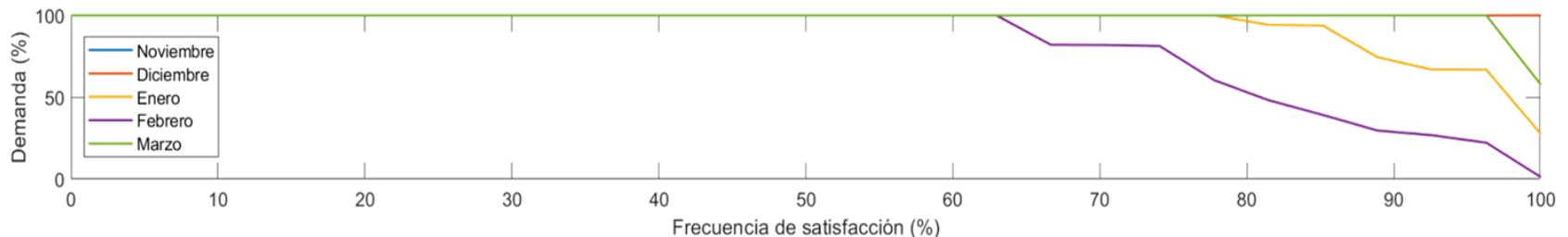
¿En qué meses no alcanzo a cubrir la demanda? ¿Por cuánto?

- ❖ Curva de la frecuencia de satisfacción para cada mes de la temporada de riego (dada una cota de vertido y un área de riego)

Hv = 5 m



Hv = 6,5 m



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Datos necesarios:

- ❖ **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, incluido el caudal ambiental (ciclo anual).
- ❖ **Curvas H-A-V** del embalse: $A = f(H)$ y $V = f(H)$.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

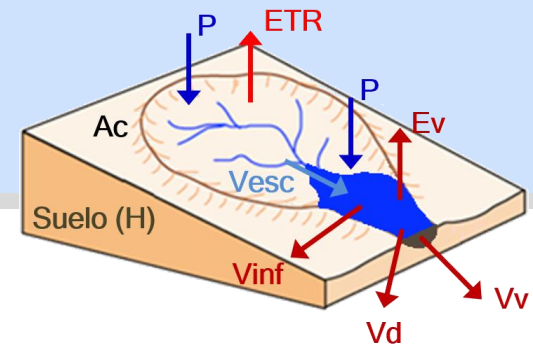
Datos necesarios:

❖ Evaporación media mensual de tanque A (mm/mes) en el período 1985-1999

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ARTIGAS	252,7	188,2	169,5	104,5	73,2	58,6	72,6	103,5	122,7	164,1	205,8	256,6
BELLA UNION	245,0	177,6	156,4	104,9	72,5	56,3	69,0	101,0	131,6	169,6	204,4	233,3
LIBERTAD	212,4	160,4	140,0	86,5	57,9	38,8	41,9	60,3	83,4	125,1	154,0	196,5
MERCEDES	257,0	199,9	176,3	112,2	75,6	55,3	62,9	92,4	121,5	164,6	204,4	244,6
MELO	225,4	173,6	157,0	103,4	66,8	52,1	58,6	81,1	105,4	145,6	176,7	221,2
PAYSANDU	264,7	202,8	182,0	118,4	82,7	59,8	71,6	104,4	128,7	172,1	212,4	249,5
P. DE LOS TOROS	265,3	202,1	180,3	108,8	79,3	55,8	66,2	90,0	119,5	167,8	213,1	254,8
PRADO	202,1	160,2	134,5	88,9	62,1	45,3	45,8	65,2	91,1	129,1	160,8	192,7
ROCHA	208,3	162,1	138,7	93,3	63,4	50,4	54,8	72,2	94,8	130,5	160,5	192,9
SALTO	237,0	179,4	161,2	102,6	71,5	51,3	61,7	87,8	115,7	159,4	199,7	229,3
TACUAREMBO	256,1	186,7	176,4	111,0	76,3	58,9	73,4	93,5	116,5	163,4	202,8	247,6
TREINTA Y TRES	234,9	179,6	162,1	103,1	71,8	50,1	57,2	75,6	101,6	144,5	182,2	227,2
TRINIDAD	226,3	168,3	147,6	97,8	67,3	47,9	56,3	79,7	102,1	140,7	173,2	213,0
YOUNG	230,6	171,6	158,5	96,9	65,9	47,5	55,6	81,4	103,9	146,8	182,3	216,8

(*) Fuente: “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas”, MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011.
Planilla complementaria al Manual, Versión 1.04, del 01/04/2013

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Algunos comentarios:

Volúmenes a contemplar:

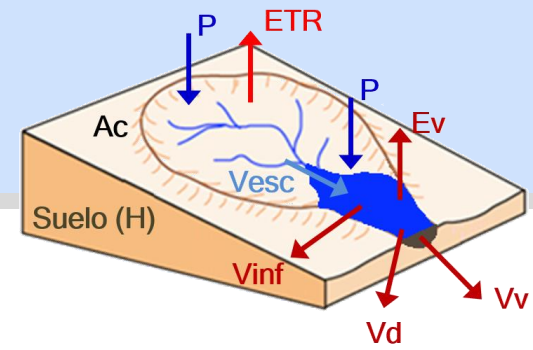
- ❖ **Vol.Esc:** Escurrimiento medio anual en la cuenca de aporte
- ❖ **Vol.Dem:** Demanda anual (Riego + Caudal ambiental)
- ❖ **Vol.Emb:** Volumen máximo de almacenamiento del embalse

Indicadores:

- ❖ Relación Cuenca/Embalse: $RCE = \text{Vol.Esc}/\text{Vol.Emb}$
(Indicador del “llenado”)
- ❖ Relación Demanda/Embalse: $RDE = \text{Vol.Dem}/\text{Vol.Emb}$
(Indicador del “cumplimiento de la demanda”)

¿Año calendario o hidrológico?

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Algunos comentarios:

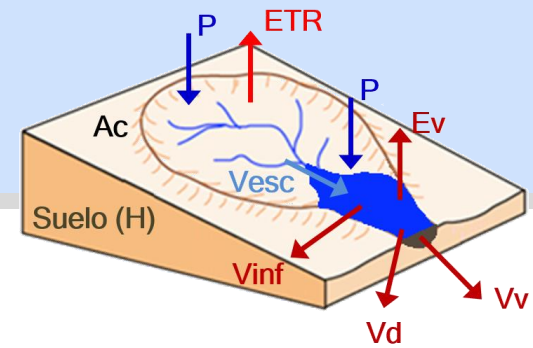
Indicador del “llenado”:

$$RCE = \text{Vol.Esc}/\text{Vol.Emb}$$

En términos medios: ¿el aporte de agua de la cuenca tiene la capacidad de llenar anualmente al embalse?

- ❖ Si RCE es muy alto, en un año húmedo es probable que haya muchos vertidos (¡cuidado con el vertedero!).
- ❖ Si RCE es muy bajo (< 1), en un año seco es muy probable que el embalse no alcance su nivel máximo.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Algunos comentarios:

Indicador del “cumplimiento de la demanda”:

$$RDE = \text{Vol.Dem}/\text{Vol.Emb}$$

¿Cómo es la capacidad de almacenamiento del embalse en relación al volumen requerido para satisfacer toda la demanda?

- ❖ Si RDE es mayor a 1 ($\text{Vol.Dem} > \text{Vol.Emb}$), se depende de la precipitación a lo largo de la temporada de riego para lograr un alto grado de satisfacción. En un año seco, es muy probable que no se logre cubrir toda la demanda.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Algunos comentarios:

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Marzo 2023

4. (12 puntos)

A partir de la siguiente información correspondiente a un embalse para riego:

- Área de la cuenca de aporte = 2750 ha
- Precipitación media anual = 1200 mm
- Coeficiente de escorrentía = 0,30 (medio anual)
- Demanda para riego = 5 Hm³
- Volumen reservado para caudal ambiental = 1 Hm³

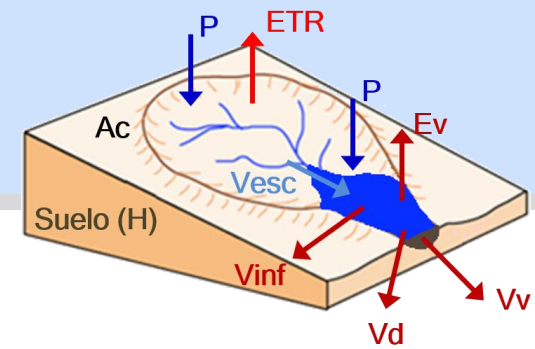
Tabla: Relación cota-volumen almacenado del embalse

Cota (m)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
V (Hm³)	0,4	0,8	1,5	2,2	4,1	5,0	7,0	9,3	11,5

Se pide:

- Calcule el volumen de escurrimiento medio anual de aporte de la cuenca. (Vol.Esc = 9,9 Hm³)
- En base a una evaluación preliminar del comportamiento del embalse en términos medios (llenado, satisfacción de la demanda, etc.) discuta las ventajas y desventajas de las siguientes dos opciones para la cota de vertido: 7 y 9 m.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Algunos comentarios:

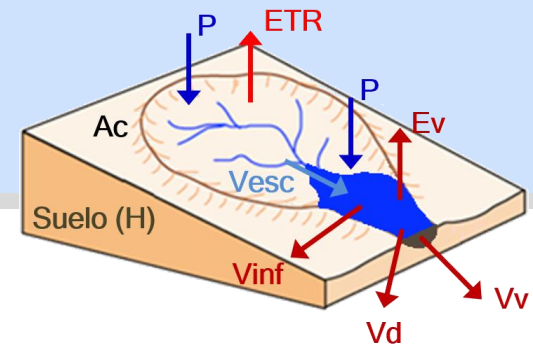
Procedimiento de cálculo:

❖ $A_{max} \ll A_c$

Es posible resolver el modelo de Temez y el balance hídrico al embalse de manera independiente y secuencial.

Estamos despreciando el error introducido al considerar dos veces la precipitación sobre la superficie del embalse, en Temez y en el balance.

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE



Algunos comentarios:

Procedimiento de cálculo:

❖ $A_{max} \approx A_c$

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

En cada paso de tiempo (mes), hay que calcular el V_{esc} que llega el embalse corrigiendo el área de la cuenca y luego resolver el balance:

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

BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo

Se emplearon los datos de precipitación suministrados por el operador del embalse y los datos de ETP y Ev (ciclo medio) de la estación del INIA Treinta y Tres.

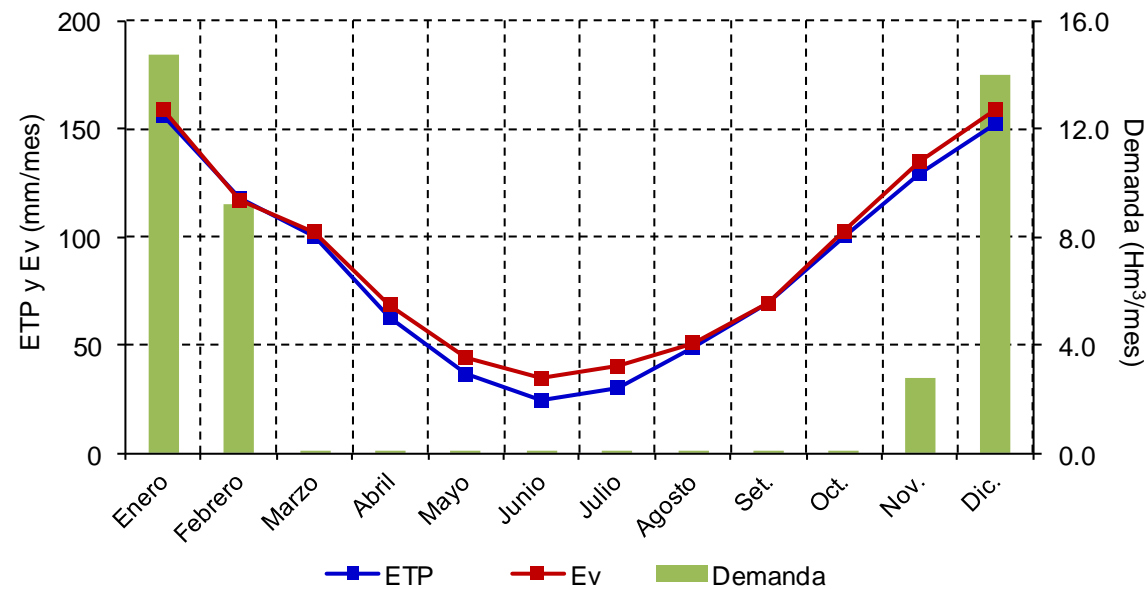
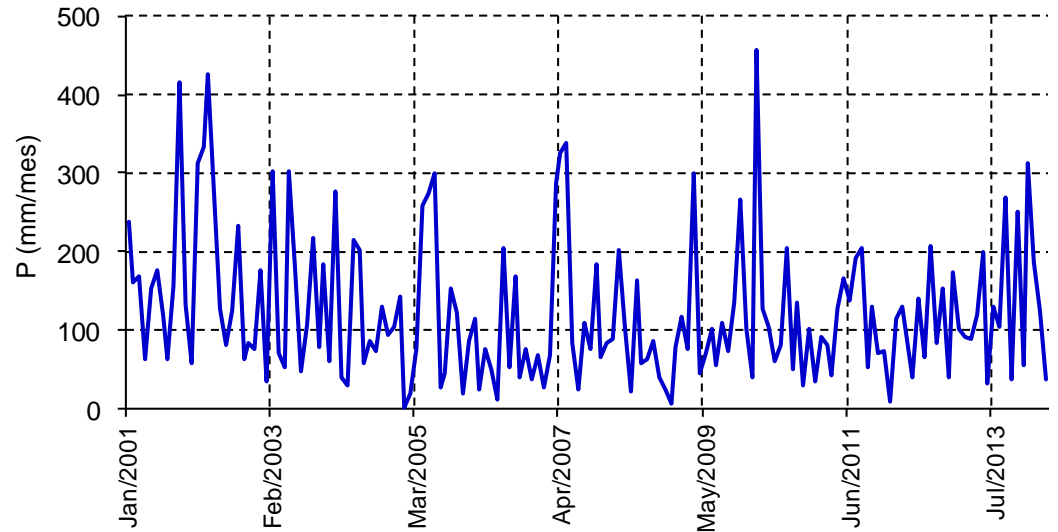
La simulación del proceso P-Q en la cuenca se realizó mediante el modelo de Temez.

Cuenca: 10.000 há

AD ponderada: 115 mm

Destino: Riego de arroz (3500 ha).

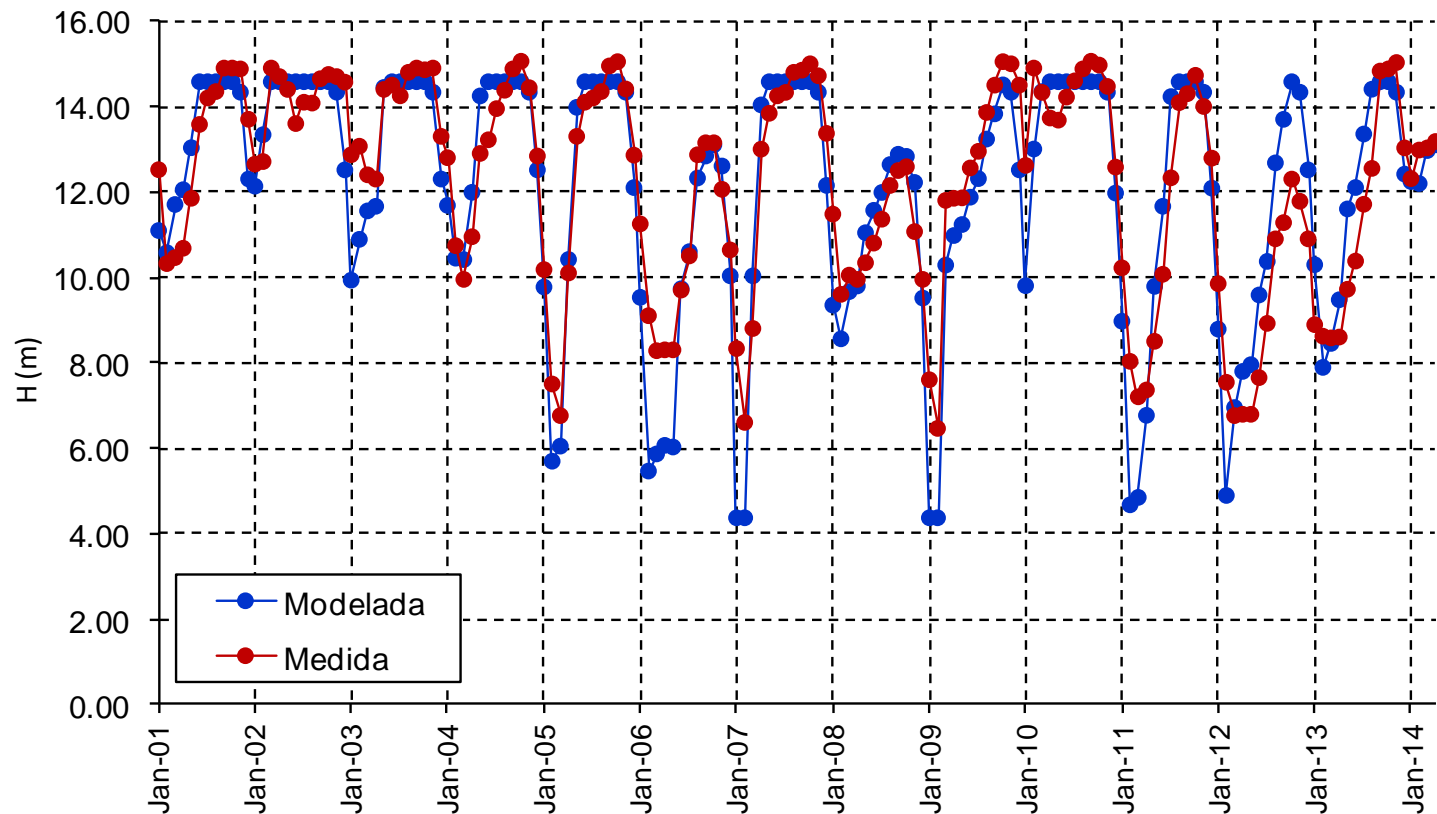
Para la demanda de los meses del período de llenado se consideró un caudal ambiental de 0,40 L/s/km² (3,58 m³/día).



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Ejemplo

Evolución de la altura de agua en el embalse en el período 2001-2014, referida a la cota del fondo del cauce: Comparación medida versus modelada.



BALANCE HÍDRICO EN UN EMBALSE

Bibliografía

- ❖ Decreto N° 368/018 sobre la reglamentación de caudales ambientales en Uruguay. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/368-2018>.
- ❖ 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>.
- ❖ UNESCO (2014). “Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay”. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 34. ISBN: 978-92-9089-194-9.