

Modelització del cicle de l'aigua durant Episodis de Sequera Simulació amb Dinàmica de Sistemes

Pràctica de Simulació Contínua

Insight Maker - Sistemes Dinàmics

11 de novembre de 2025

- 1 Introducció: Insight Maker
- 2 Context: La Sequera a Catalunya
- 3 Marc Teòric: El Semàfor de la Sequera
- 4 Dades de Partida
- 5 Estructura del Model Base
- 6 Assumpcions del Model
- 7 Objectius de la Pràctica
- 8 Extensions del Model

Què és Insight Maker?

Eina de simulació en línia

- Modelització de sistemes dinàmics
- Interfície visual i intuïtiva
- Gratuïta i accessible via web
- Ideal per a prototipatge ràpid

Característiques clau

- **Stocks**: Acumuladors (nivells)
- **Flows**: Fluxos entre stocks
- **Converters**: Variables calculades
- **Links**: Connexions causals

Permet modelar bucles de retroalimentació i comportaments no lineals

Context

Catalunya pateix episodis recurrents de sequera que amenacen:

- L'abastament urbà d'aigua potable
- L'agricultura i la indústria
- Els ecosistemes fluvials

Mesures de gestió disponibles

- 1 **Restriccions de consum** (obligatòries i voluntàries)
- 2 **Dessalinitzadores** (El Prat i Tordera)
- 3 **Regeneració d'aigües residuals**
- 4 **Transvasaments** entre conques

El Semàfor de la Sequera de l'ACA

Escenari	% Embassament	Estalvi Forçat	Color
Normalitat	> 60%	0%	Blau
Prealerta	40 – 60%	0%	Verd
Alerta	25 – 40%	12%	Groc
Excepcionalitat	16 – 25%	20%	Taronja
Emergència	< 16%	40%	Vermell

Taula: Llímits oficials i restriccions per escenari

Nota

Els percentatges d'estalvi són sobre el consum habitual

Equacions bàsiques del sistema

Balanç de massa dels embassaments

$$\frac{dV_{\text{emb}}}{dt} = Q_{\text{aport}} - Q_{\text{desemb}} \quad (1)$$

on V_{emb} és el volum embassat, Q_{aport} les aportacions naturals i Q_{desemb} el desembassament.

Consum efectiu

$$Q_{\text{consum}} = Q_{\text{base}} \cdot (1 - r_{\text{forçat}}) \cdot (1 - r_{\text{voluntari}}) \quad (2)$$

on $r_{\text{forçat}}$ és la restricció oficial i $r_{\text{voluntari}}$ l'estalvi voluntari.

Cabal del riu

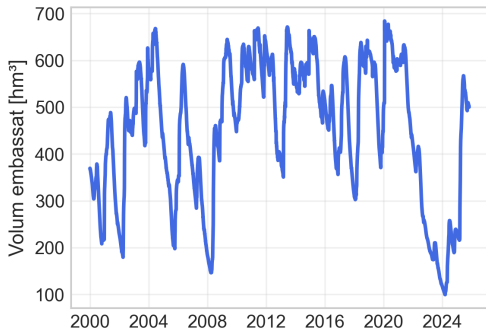
$$Q_{\text{riu}} \equiv Q_{\text{desemb}} = \max(Q_{\text{eco}}, Q_{\text{eco}} + Q_{\text{consum}} - Q_{\text{dessal}} - Q_{\text{regen}}, Q_{\text{vessament}}) \quad (3)$$

on Q_{eco} és el cabal ecològic mínim, Q_{dessal} la dessalinització i Q_{regen} la reutilització d'aigua.

Dades històriques setmanals

- Volum embassat total [hm^3]
- Aportacions totals [hm^3/setm]
- Producció dessalinitzadores [hm^3/setm]
- Període: 2000-2025

Evolució dels nivells embassats



Paràmetres del sistema

- Capacitat màxima: $\sim 693 \text{ hm}^3$
- Consum setmanal estimat: $14 \text{ hm}^3/\text{setm}$
- Dessalinització màxima: $\sim 1.5 \text{ hm}^3/\text{setm}$
- Cabal mínim: 3 hm^3 - Regen. $1 \text{ hm}^3/\text{setm}$

Producció setmanal de dessalinització

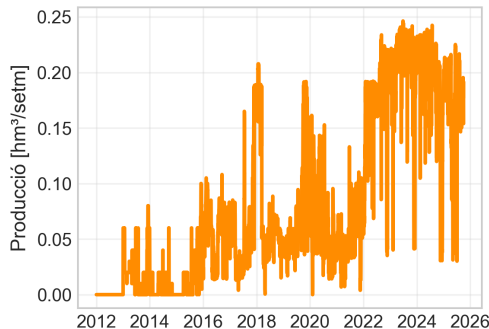
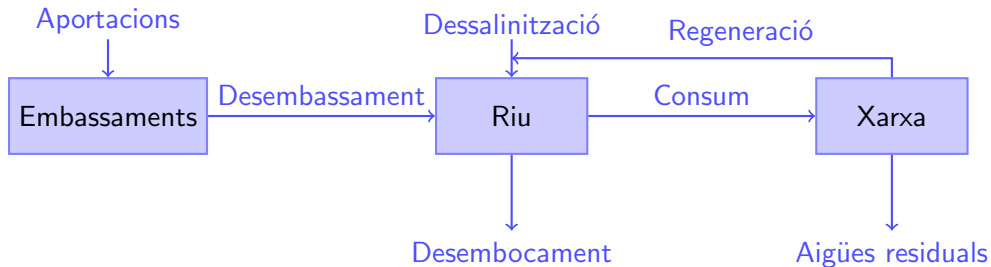


Diagrama Conceptual del Model



Estructura bàsica: 3 stocks + fluxos controlats per nivell d'embassament i de consum

STOCKS (Nivells)

- 1 **Embassaments**: Volum agregat
- 2 **Riu**: Buffer intermedi
- 3 **Xarxa**: Aigua distribuïda

FLOWS (Fluxos)

- Aportacions naturals
- Dessalinització
- Desembassament
- Consum (domèstic, agrícola i industrial)
- Desembocament
- Aigües residuals

VARIABLES & CONVERTERS

- Nivell embassat [%]
- Cabal ecològic o mínim [hm^3/setm]
- Capacitat màxima [hm^3]
- Dessalinització màxima [hm^3/setm]
- Restriccions forçades
- Estalvi voluntari (Màxim 3.5%)
 $f(\text{ScarcityPerception}, \text{ReservoirLevelTrend})$

INPUTS (Dades externes)

- Sèrie històrica d'aportacions
- Producció dessalinitzadores històrica
- Volum històric embassat

Objectius de la Modelització

Objectiu 1: Calibració i Validació

- Reproduir els nivells històrics d'embassament (2000-2024)
- Utilitzar dessalació històrica com a input
- Ajustar consum base, restriccions i paràmetres del model

Objectiu 2: Mitigació cost/efectiva de les sequeres

- Implementar **3 bucles de retroalimentació negativa**:
 - 1 **Bucle 1**: Nivell baix → Activació dessalinitzadores → Menys dessembassament
 - 2 **Bucle 2**: Nivell baix → Restriccions + Percepció → Menys consum
 - 3 **Bucle 3**: Nivell alt → Vessaments controlats → Més dessembassament
- 4 Ajustar restriccions (intensitat i llindars) i gestió de vessaments
- 5 Configurar gestió dinàmica de la dessalinització i capacitat màxima.
- 6 Funció objectiu:

$$CostTotal = Estalvi \cdot 1500000 + Dessal. \cdot 400000 + Regen. \cdot 150000 + (Desal.Max - 1.5) \cdot 2000000$$

Restriccions Forçades

Implementació *esglaonada*:

- Salts discrets
- Aplicació immediata

$$r_{forcat} = \begin{cases} 0\% & \text{si } V > 40\% \\ 12\% & \text{si } 25\% < V \leq 40\% \\ \vdots & \end{cases}$$

Restriccions Voluntàries

Implementació *contínua*:

- Depèn de percepció d'escassetat
- Pot combinar nivell + tendència
- S'activa des de prealerta
- Pot modular-se per memòria social
 - Persisteix més enllà de les fases de sequera
 - Pot "oblidar-se" amb el temps

$$r_{vol} = \min(f(\text{level}, \text{trend}), M)$$

on M és la memòria social

Experimentació: avaluant la solució

Indicadors d'Avaluació Possibles

- Cost econòmic total (funció objectiu a minimitzar)
- Nombre de setmanes en alerta, excepcionalitat o en emergència (minimitzar)
- Volum mínim assolit (maximitzar)
- Estalvi total d'aigua (minimitzar)
- Desembassaments totals
- Grau d'utilització de les dessalinitzadores (factor de càrrega)

Criteris de factibilitat

- El nivell dels embassaments ha de mantenir-se entre 0 y 100: $V \in (0, 100)$
- Els compartiments *Riu* i *Xarxa* han de mantenir-se estables.
- El volum de regeneració ha de ser inferior al consum (Mantindreu màxim 1hm³/setm)

1. Desagregació Geogràfica: Sistema Ter-Llobregat

- **2 stocks:** Volum Ter + Volum Llobregat
- Aportacions específiques per cada conca (50% Ter, 40% Llobregat, 10% Muga i altres)
- Desagregació de Dessalinitzadores → El Prat (Llobregat) i Tordera (Ter)
- **Transvasament Ter → Llobregat** (capacitat limitada)
- Restriccions independents per cada sistema / Aportacions post desembassament
- Demanda amb variabilitat estacional (més alta a l'estiu)

2. Desagregació per Embassaments Individuals

Sistema Ter

- Sau
- Susqueda

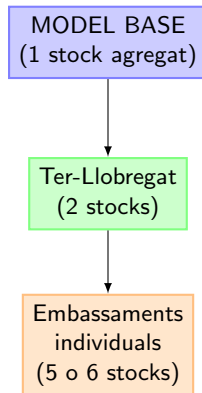
Sistema Llobregat

- La Baells
- Sant Ponç
- La Llosa del Cavall

Sistema Muga

- Darnius-Boadella

Diagrama de Millora Progressiva



Principi de modelització: Començar simple, validar, incrementar complexitat