DISEÑO HIDROLÓGICO

ESCURRIMIENTOS MEDIOS: DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Edición 2025

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

Índice

- **Introducción**
- **Disponibilidad del recurso**
  - Balance hídrico en una cuenca
  - Modelos hidrológicos de escurrimiento
- **Modelo de Temez**
  - Estructura del modelo
  - Ejemplo de cálculo
  - Calibración del modelo en Uruguay
  - Aplicación del modelo en cuencas de Uruguay

INTRODUCCIÓN

Hasta ahora vieron (**HHA**):

- Ciclo hidrológico
- Cuenca hidrográfica y geomorfología
- Agua en la atmósfera:

  Precipitación / Evaporación / Evapotranspiración
- Agua en el suelo:

  Agua subsuperficial / Agua superficial / Balance hídrico
- Elementos para el diseño de obras hidráulicas:

  Eventos extremos (Tr, Tc, Método Racional, Método NRCS)

INTRODUCCIÓN

Ahora nos interesa:

Estimar la DISPONIBILIDAD DE AGUA en una cuenca para satisfacer los distintos usos.

USOS DEL AGUA

- Abastecimiento
- Energía
- Riego
- Recreación, etc.

APROVECHAMIENTOS

- Tomas directas
- Represas/Tajamares
- Reservorios/Tanques
- Pozos (agua subterránea)

INTRODUCCIÓN

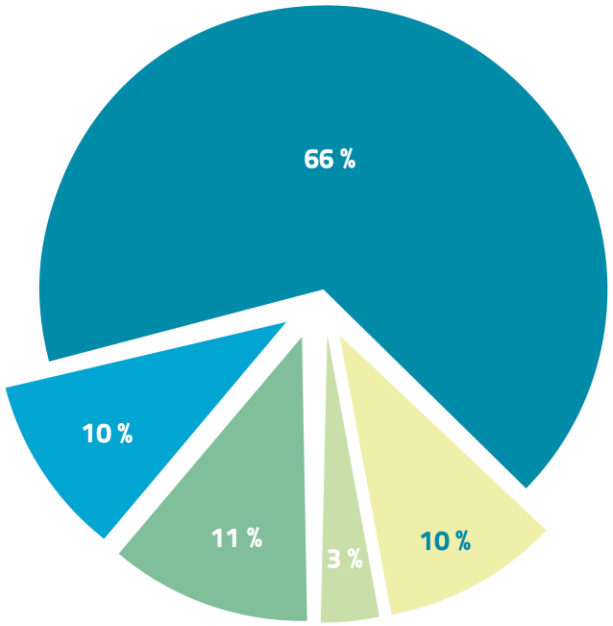
Aprovechamientos de agua:

OBRAS POR TIPO Y USO

Cantidad de obras

	USO					
	Consumo Humano	Industrial	Riego	Otros usos agropecuarios	Otros usos	TOTAL
Embalses	5	18	1.250	50	40	**1.363**
Tomas	62	47	483	2	23	**617**
Tanques	3	2	591	14	4	**614**
Pozos	555	509	1.435	499	98	**3.096**
TOTAL	**625**	**576**	**3.759**	**565**	**165**	**5.690**

Obras por uso (%)



Riego | Industrial | Consumo humano | Otros | Otros usos agropecuarios

(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 8: “Gestión de recursos hídricos”.

INTRODUCCIÓN

Aprovechamientos de agua:

VOLÚMENES ANUALES POR TIPO Y USO

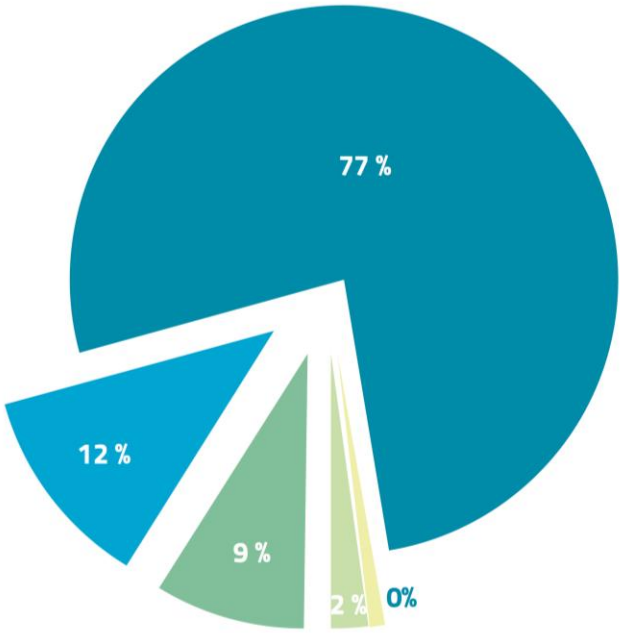
Volumen de uso anual ($x10^3 m^3$)

	USO					
	Consumo Humano	Industrial	Riego	Otros usos agropecuarios	Otros usos	TOTAL
Embalses	12.050	5.311	2.139.044	13.707	10.474	**2.180.586**
Tomas	381.760	515.554	1.363.801	426	79.467	**2.341.008**
Tanques	13	14	2.996	2	9	**3.033**
Pozos	17.367	21.536	47.378	11.828	10.326	**108.435**
TOTAL	**411.190**	**542.414**	**3.553.220**	**25.963**	**100.275**	**4.633.063**

Obras autorizadas, inventariadas o en trámite hasta el 30/12/2015

Riego | Industrial | Consumo humano | Otros | Otros usos agropecuarios

Volumen de uso anual Por uso (%)



(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 8: “Gestión de recursos hídricos”.

INTRODUCCIÓN

Plan Nacional de Aguas:

- Instrumento técnico político para la planificación y gestión de las aguas en Uruguay considerando los diversos usos del recurso.
- Aprobado por decreto del Poder Ejecutivo en 2017.
- Tres grandes objetivos:
  - el agua para un desarrollo sostenible,
  - el acceso al agua y el saneamiento como derecho humano, y
  - la gestión del riesgo de inundaciones y sequías.
- Diagnóstico de la situación de los recursos hídricos, posibles escenarios a futuro, identificación de los aspectos críticos y líneas de acción.

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

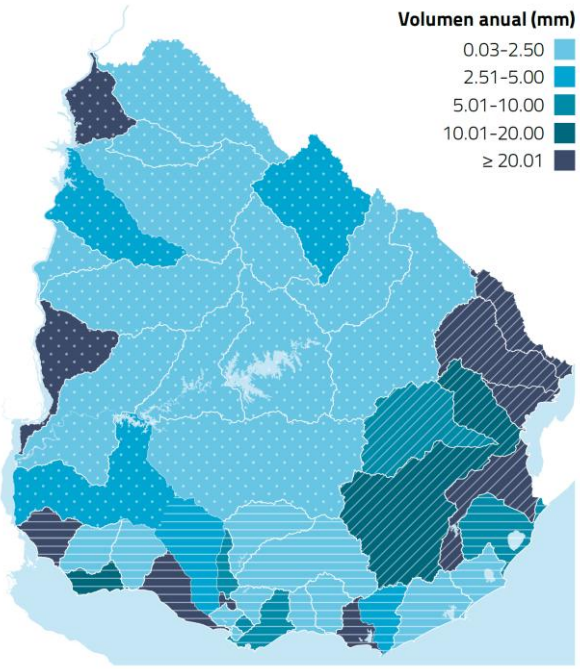
INTRODUCCIÓN

Aprovechamientos de agua:

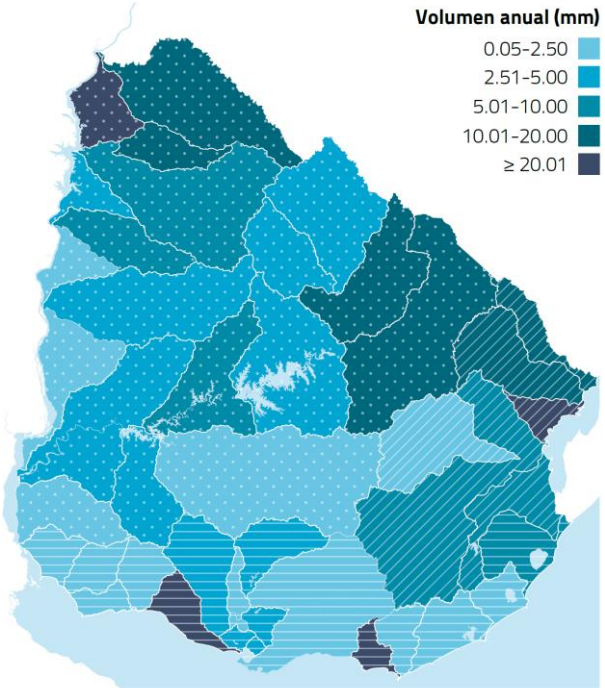
DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

Cuenca río Uruguay
Cuenca laguna Merín
Cuenca Río de la Plata y Frente Marítimo

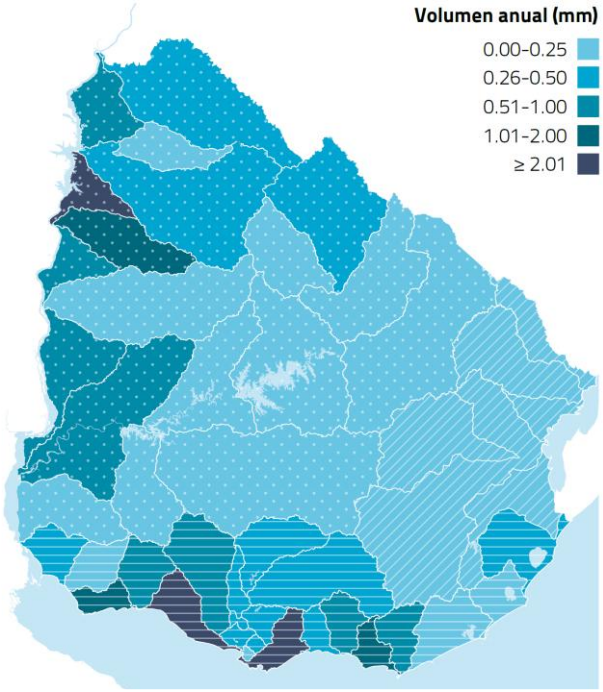
Volumen de uso anual por unidad de área (mm)



Tomas directas



Embalses



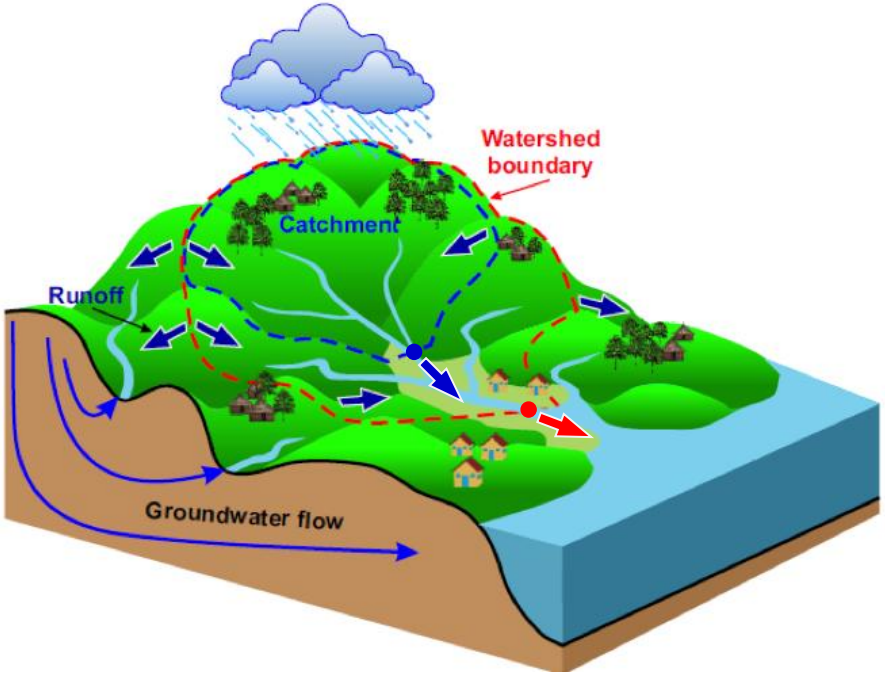
Pozos

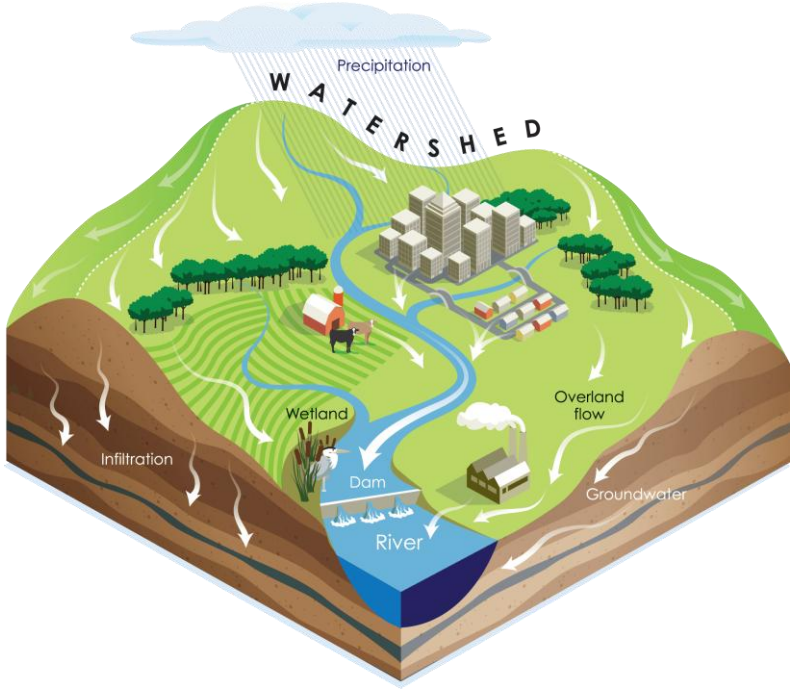
(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 8: “Gestión de recursos hídricos”.

Disponibilidad del Recurso

Disponibilidad de agua en una cuenca

???

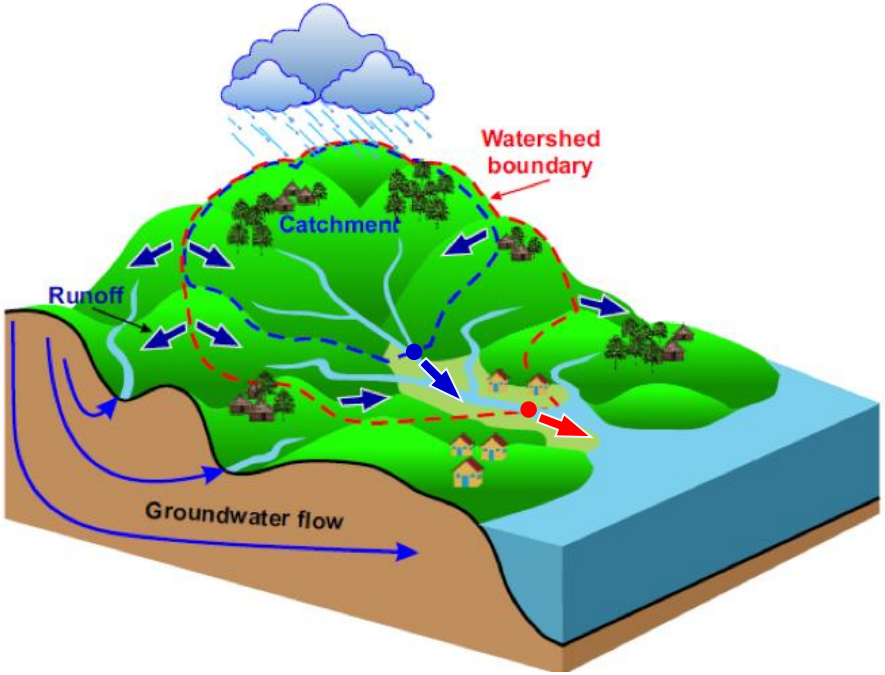


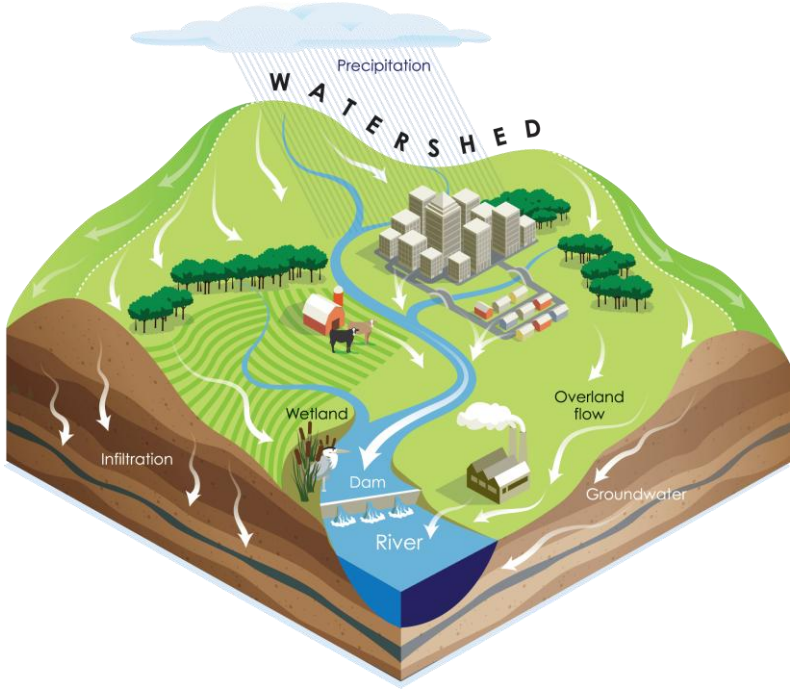


DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Disponibilidad de agua en una cuenca

- Estimación de la **magnitud** del recurso.
- Distribución **espacial** del recurso.
- Distribución **temporal** del recurso (variabilidad).





DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Disponibilidad de agua en una cuenca

- Estimación de la **magnitud** del recurso.
- Distribución **espacial** del recurso.
- Distribución **temporal** del recurso (variabilidad).

Herramienta principal:

BALANCE HÍDRICO A LA CUENCA

DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Disponibilidad de agua en una cuenca

- Estimación de la **magnitud** del recurso.
- Distribución **espacial** del recurso.
- Distribución **temporal** del recurso (variabilidad).

Herramienta principal:

BALANCE HÍDRICO A LA CUENCA

RED DE MONITOREO:

Pluviométrico, Meteorológico, Hidrométrico

DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

Balance hídrico

Equilibrio entre todos los recursos hídricos que **ingresan o egresan** 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:

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

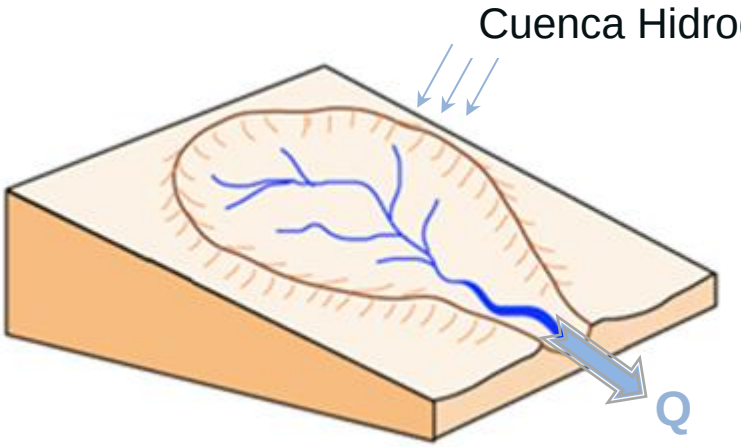
donde ***I(t)*** son los ingresos al sistema, ***O(t)*** las salidas del sistema y ***S*** la variable de estado **(*)** que representa el volumen de agua almacenada.

(*) Variable (magnitud) que caracteriza al estado del sistema en un momento dado.

Disponibilidad del Recurso

Balance hídrico

Sistema/Volumen de Control



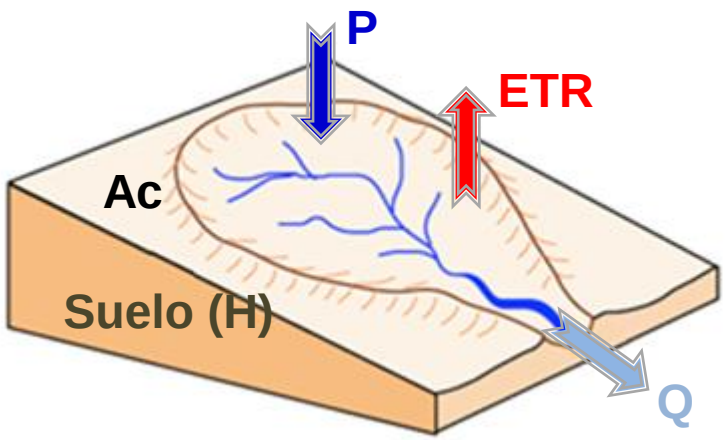
Laguna/Lago natural

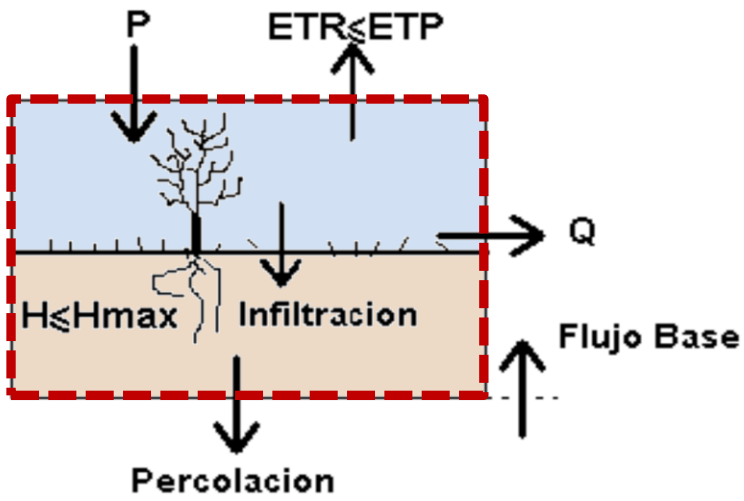
Embalse artificial

BALANCE HÍDRICO MENSUAL EN UNA CUENCA

Componentes principales

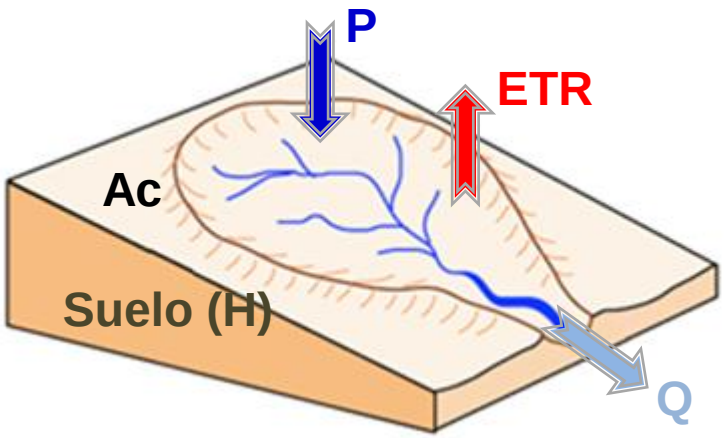
- Definición de un **volumen de control** representativo del sistema.
- Identificación de los **flujos de entrada y salida** del sistema.
- Identificación de las **variables de estado** del sistema.

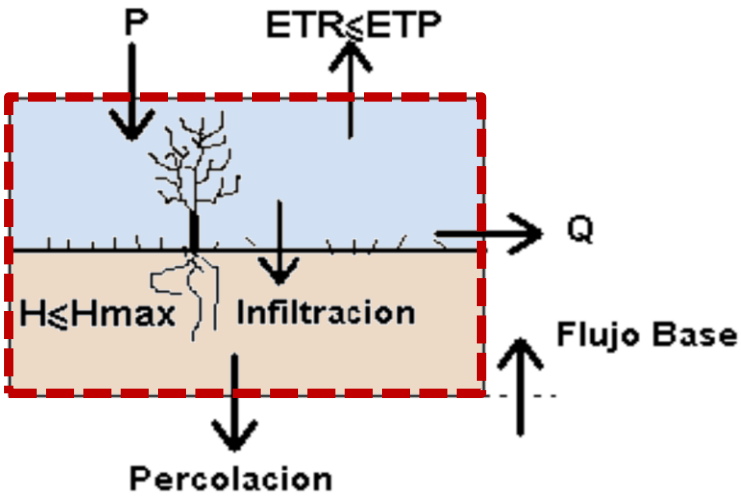




BALANCE HÍDRICO MENSUAL EN UNA CUENCA

Componentes principales



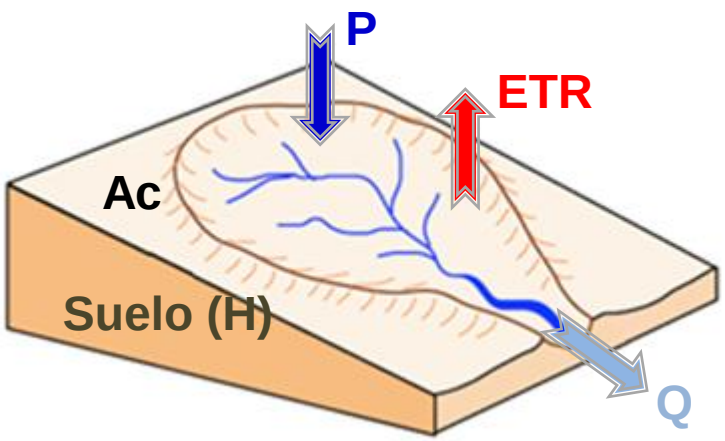


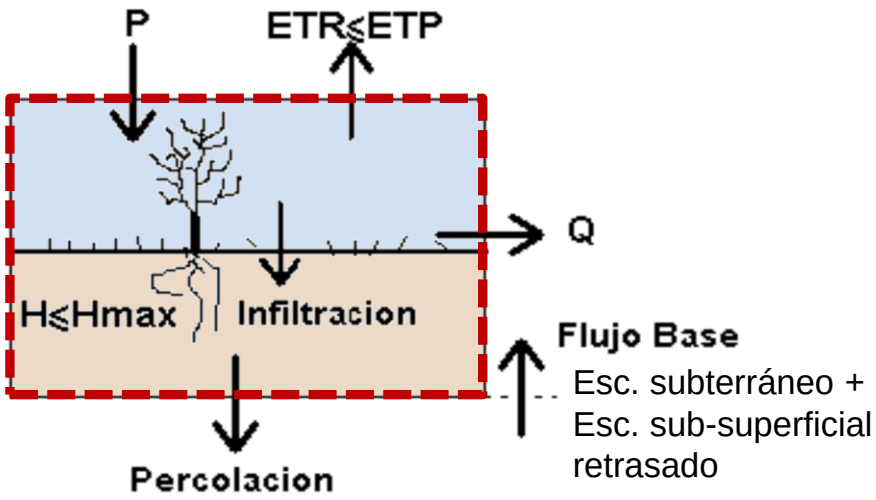
Volumen de control representativo del sistema:

- Superficie de la cuenca (extensión superficial), la atmósfera circundante (a través de la cual se realizan los intercambios de agua con el suelo y la vegetación), la zona superficial del terreno y la zona no saturada del suelo.
- Este ejemplo NO incluye a la zona saturada del suelo.

BALANCE HÍDRICO MENSUAL EN UNA CUENCA

Componentes principales

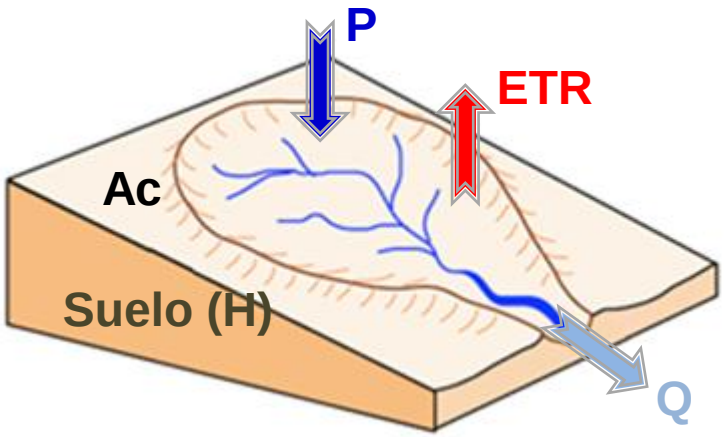




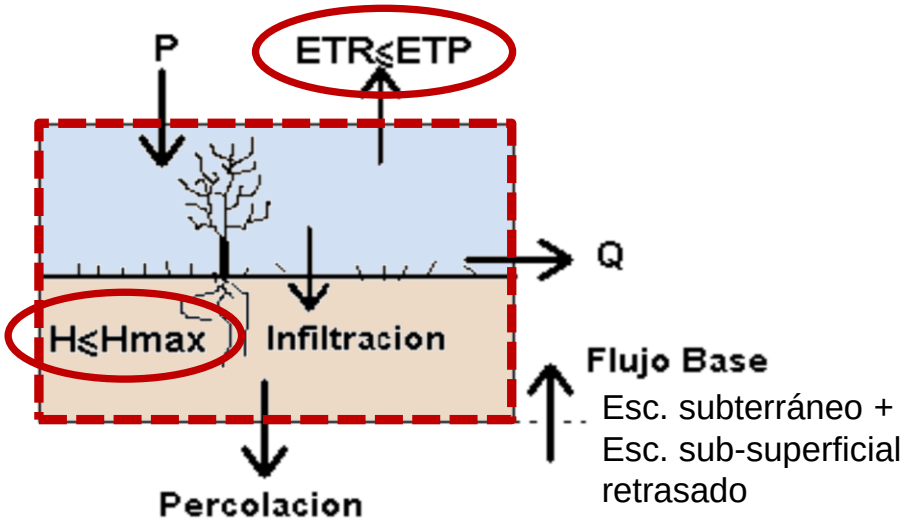
Variable	Descripción	Entrada/Salida
P	Precipitación	Entrada al sistema
FB	Flujo base	Entrada al sistema
ETR	Evapotranspiración Real (ETR ≤ ETP)	Salida del sistema
Q	Escorrentía	Salida del sistema
Per	Percolación	Salida del sistema
H	Humedad del suelo (H ≤ Hmax)	Variable de estado
h	Nivel en embalses/reservorios	Variable de estado

BALANCE HÍDRICO MENSUAL EN UNA CUENCA

Componentes principales



Condiciones limitantes



Variable	Descripción	Entrada/Salida
P	Precipitación	Entrada al sistema
FB	Flujo base	Entrada al sistema
ETR	Evapotranspiración Real (ETR ≤ ETP)	Salida del sistema
Q	Escorrentía	Salida del sistema
Per	Percolación	Salida del sistema
H	Humedad del suelo (H ≤ Hmax)	Variable de estado
h	Nivel en embalses/reservorios	Variable de estado

Modelos de balance hídrico en cuencas

Concepto

¿Qué es un modelo?

MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Concepto

¿Qué es un modelo?

Representación conceptual, e implementación matemática, de los **procesos físicos clave (*)** que regulan el fenómeno que se busca describir, analizar, simular y/o predecir para asistir a un buen diseño hidrológico (en este caso).

(*) Necesariamente son "**simplificaciones inteligentes**" de una realidad más compleja**.**

- Los modelos **pueden diferir en sus objetivos** (pueden querer representar distintos fenómenos: caudales extremos, escurrimientos medios, etc.) o, coincidiendo en el objetivo, **pueden diferir en cómo lo representan** (marco conceptual), ya sea porque priorizan distintos procesos o en función de la disponibilidad de información real para calibrar/ajustar el modelo.

MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Características de los modelos

- Existen diferentes modelos de balance hídrico de **carácter agregado (*)**, que requieren pocos parámetros para su aplicación.

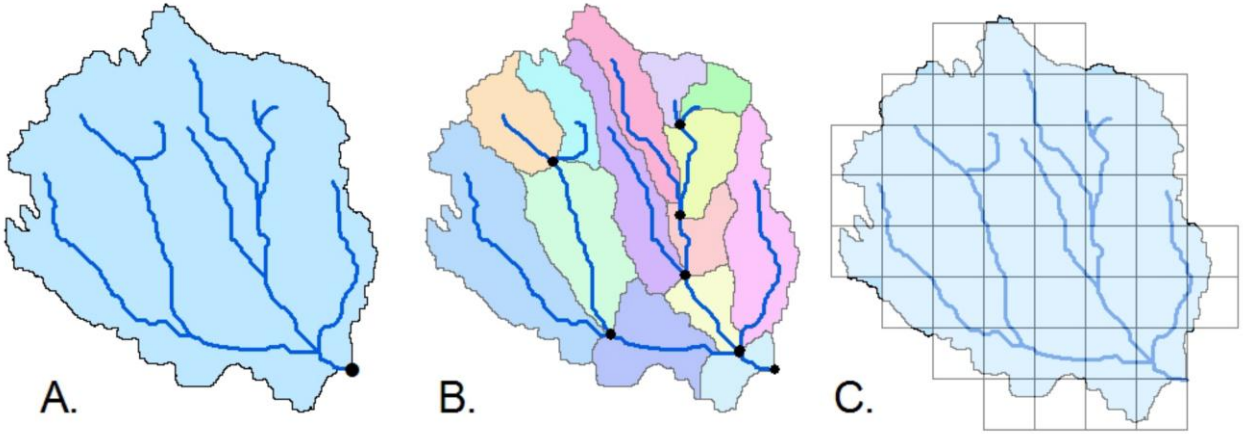
MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Características de los modelos

- Existen diferentes modelos de balance hídrico de **carácter agregado (*)**, que requieren pocos parámetros para su aplicación.

> **(*) Modelo agregado**: Trabaja con **valores medios** de las variables y parámetros en la cuenca, **no considera la distribución espacial** de los mismos.

Variabilidad espacial



Agregado **Semidistribuido** **Distribuido**

(*) Tomado de EPA (2017): “An Overview of Rainfall-Runoff Model Types”.

MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Características de los modelos

- Existen diferentes modelos de balance hídrico de **carácter agregado**, que requieren pocos parámetros para su aplicación.
- El modelo propuesto por Thornthwaite (1948) fue el precursor de todos los demás modelos agregados propuestos.
- Simplifican el ciclo hidrológico reduciéndolo a pocas componentes principales y trabajando a **escala temporal mensual**.

MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Características de los modelos

- Existen diferentes modelos de balance hídrico de **carácter agregado**, que requieren pocos parámetros para su aplicación.
- El modelo propuesto por Thornthwaite (1948) fue el precursor de todos los demás modelos agregados propuestos.
- Simplifican el ciclo hidrológico reduciéndolo a pocas componentes principales y trabajando a **escala temporal mensual**.

Características comunes

- Ecuación de continuidad
- Estructura simple/pocos parámetros
- Estimación de los parámetros por calibración de datos medidos

Características diferentes

- Procesos hidrológicos
- Número de almacenamientos del suelo
- Datos requeridos

MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Características de los modelos

Aplicación en Uruguay (IMFIA):

- Thornthwaite (1948)
- Thornthwaite and Mather (1955, 1957)
- Temez (1977)

Si el objetivo es la determinación de escurrimientos mensuales en una cuenca, por ejemplo para el dimensionado de embalses, el modelo más adecuado resultó ser el **modelo de Temez**.

Para otras aplicaciones, como por ejemplo la determinación del suplemento de riego de cultivos, no se descarta la aplicación de los otros modelos evaluados.

Modelos de balance hídrico en cuencas

Aplicaciones

???

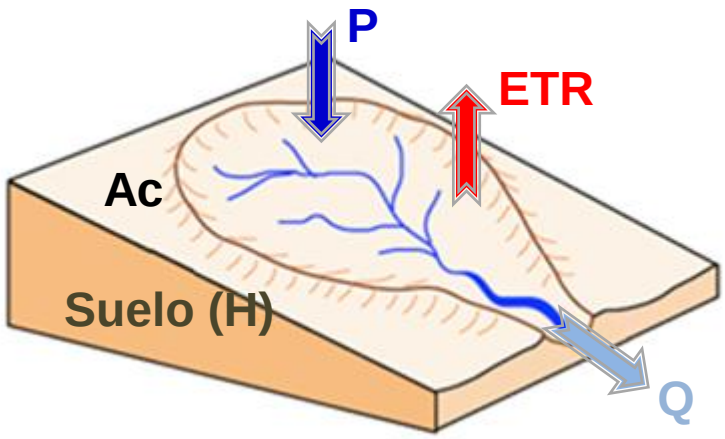
MODELOS DE BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS

Aplicaciones

- Gestión de recursos hídricos
- Diseño de obras hidráulicas: riego, energía, agua potable
- Evaluación de impactos ambientales
- Generación de datos de escorrentía: extensión/relleno de series o generación de datos en cuencas no aforadas
- Cuantificación del impacto y adaptación al cambio climático

ESCURRIMIENTO MENSUAL

Expresión de las características **fisiográficas** y **climáticas** que rigen la relación entre la precipitación y la escorrentía media de una cuenca.

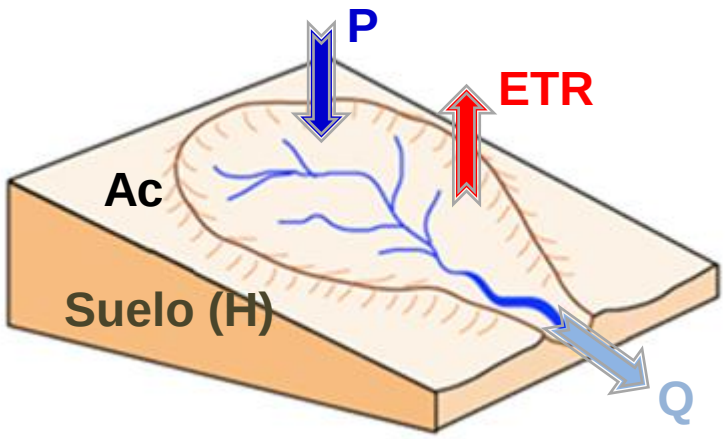


ESCURRIMIENTO MENSUAL

Expresión de las características **fisiográficas** y **climáticas** que rigen la relación entre la precipitación y la escorrentía media de una cuenca.

Factores climáticos	
Precipitación	Distribución de intensidad en el tiempo y espacio.
Evaporación	Radiación solar. Temperatura. Velocidad de viento. Humedad de aire. Naturaleza y forma de la superficie evaporativa.
Transpiración	Radiación solar. Temperatura. Velocidad de viento. Humedad de aire. Humedad del suelo y tipo de vegetación.

Factores fisiográficos	
Factores físicos	Tipo y uso del suelo. Topografía.

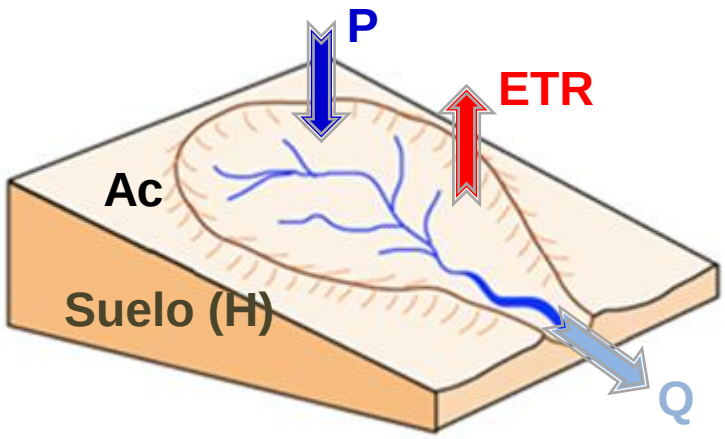


ESCURRIMIENTO MENSUAL

Expresión de las características **fisiográficas** y **climáticas** que rigen la relación entre la precipitación y la escorrentía media de una cuenca.

Factores climáticos	
Precipitación	Distribución de intensidad en el tiempo y espacio.
Evaporación	Radiación solar. Temperatura. Velocidad de viento. Humedad de aire. Naturaleza y forma de la superficie evaporativa.
Transpiración	Radiación solar. Temperatura. Velocidad de viento. Humedad de aire. Humedad del suelo y tipo de vegetación.

Factores fisiográficos	
Factores físicos	Tipo y uso del suelo. Topografía.



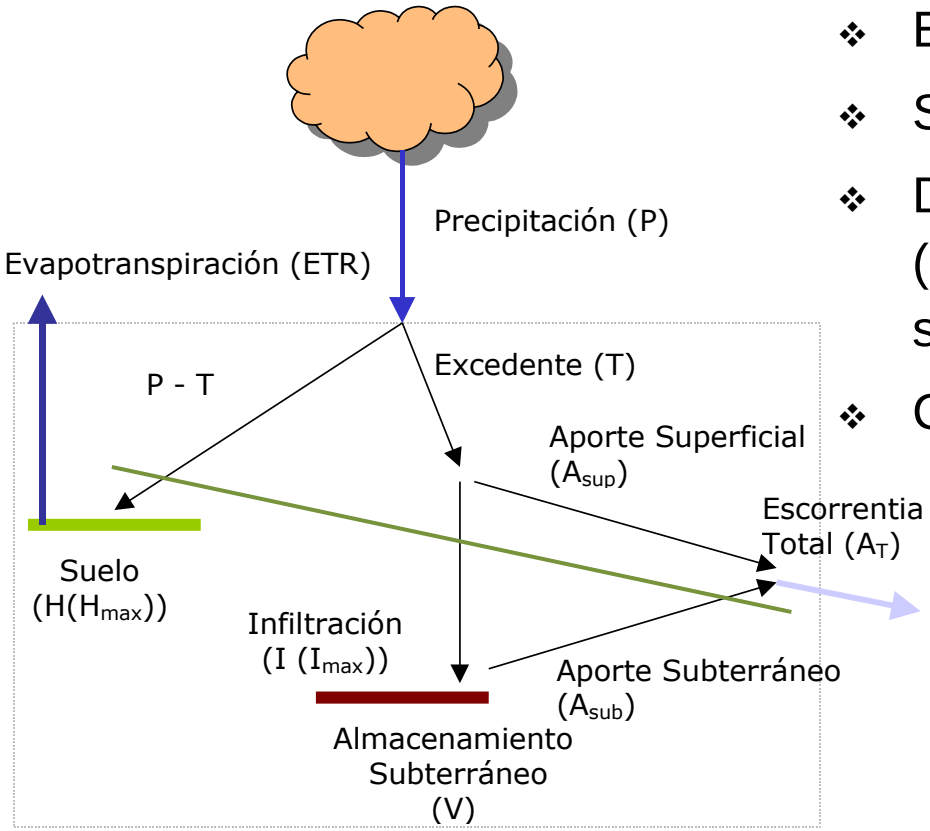
El **peso relativo** de cada uno de estos factores depende de las características locales de la zona de estudio.

En cada caso, es necesario encontrar el modelo que mejor represente los **procesos hidrológicos más significativos**.

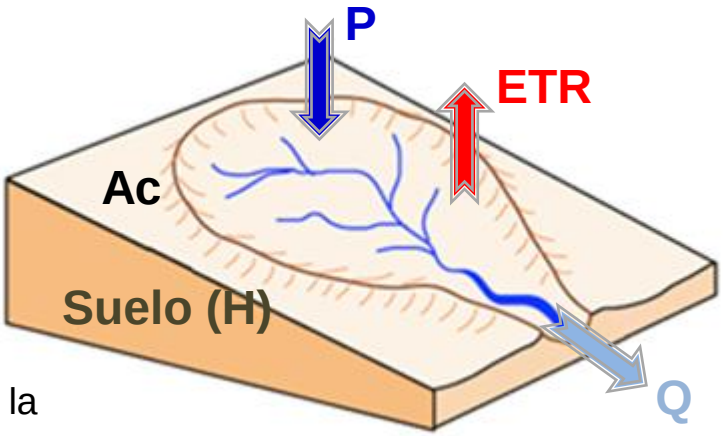
MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



- Balance hídrico AGREGADO **(*)**
- Modelo continuo de paso mensual
- Entrada: P, ETP
- Salida: Q
- Dos almacenamientos: capas superior (no saturada) e inferior (saturada) del suelo. Variables de estado: H, V
- Cuatro parámetros

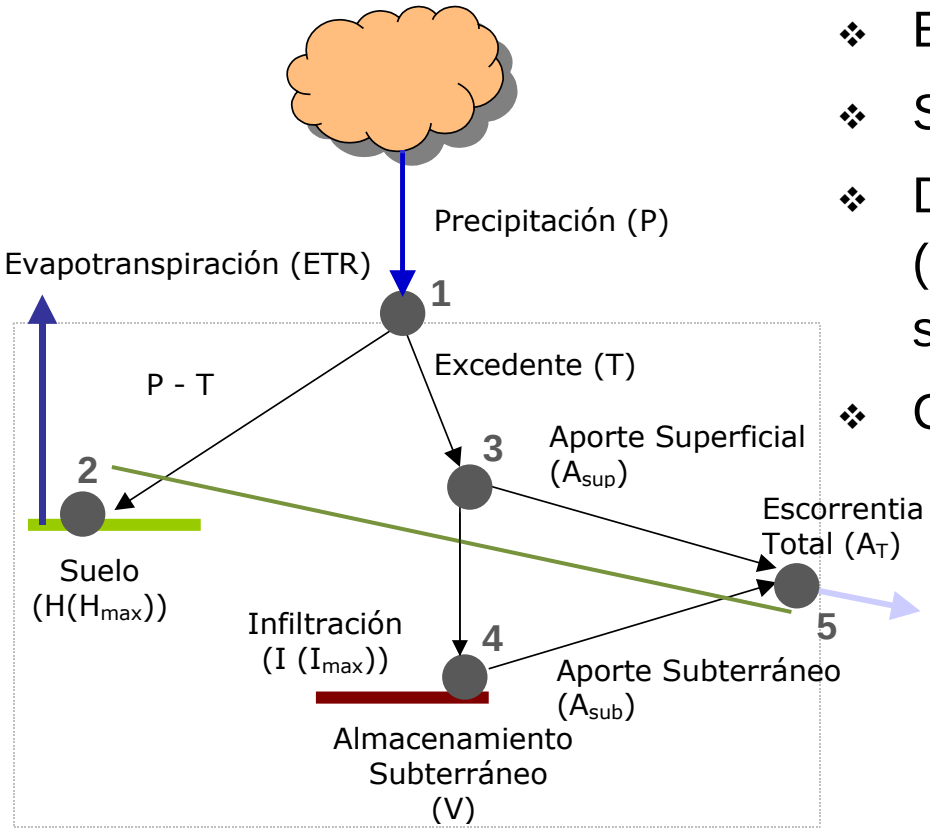


(*) Trabaja con valores medios de las variables y parámetros en la cuenca, no considera la distribución espacial de los mismos.

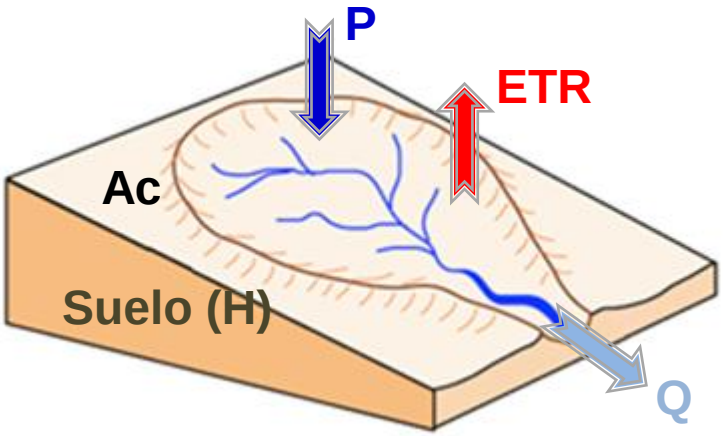
MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



- Balance hídrico AGREGADO **(*)**
- Modelo continuo de paso mensual
- Entrada: P, ETP
- Salida: Q
- Dos almacenamientos: capas superior (no saturada) e inferior (saturada) del suelo. Variables de estado: H, V
- Cuatro parámetros

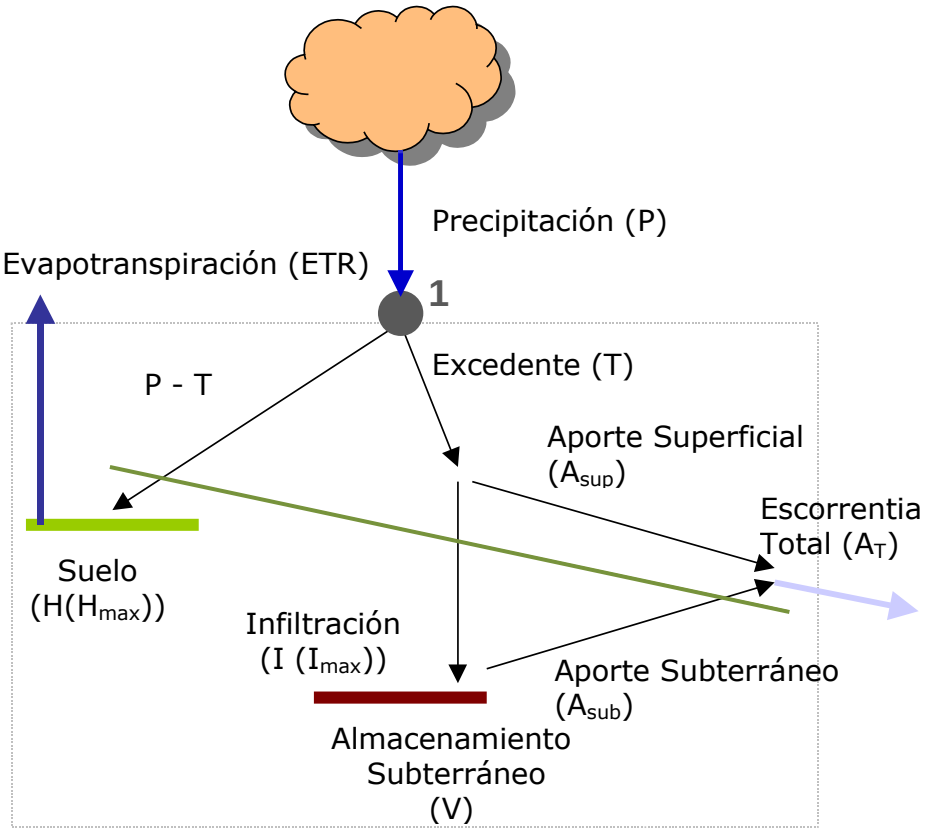


Las ecuaciones del modelo resultan de aplicar un balance hídrico a **cinco volúmenes de control**.

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



Cálculo del excedente

$$T_i = 0 \qquad \text{si } P_i \le P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \qquad \text{si } P_i > P_{oi}$$

siendo:

$$\delta_i = H_{max} - H_{i-1} + ETP_i$$

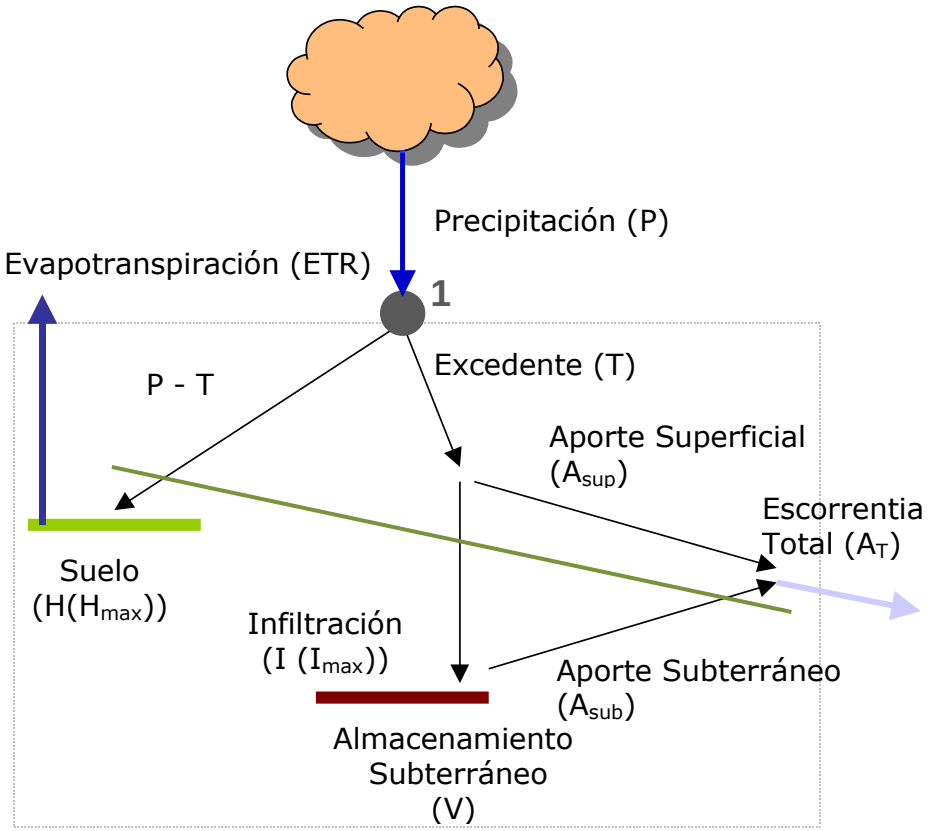
$$P_{oi} = CPo\ (H_{max} - H_{i-1})$$

Lluvia no uniforme: Puede haber escurrimiento sin que se haya cubierto la demanda de ETP y de humedad del suelo.

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



Lluvia no uniforme: Puede haber escurrimiento sin que se haya cubierto la demanda de ETP y de humedad del suelo.

Hmax: Capacidad máxima de retención de agua en la capa superior del suelo.

CPo: Segundo parámetro del modelo.

Cálculo del excedente

$$T_i = 0 \qquad \text{si } P_i \le P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \qquad \text{si } P_i > P_{oi}$$

siendo:

$$\delta_i = H_{max} - H_{i-1} + ETP_i$$

$$P_{oi} = CPo\,(H_{max} - H_{i-1})$$

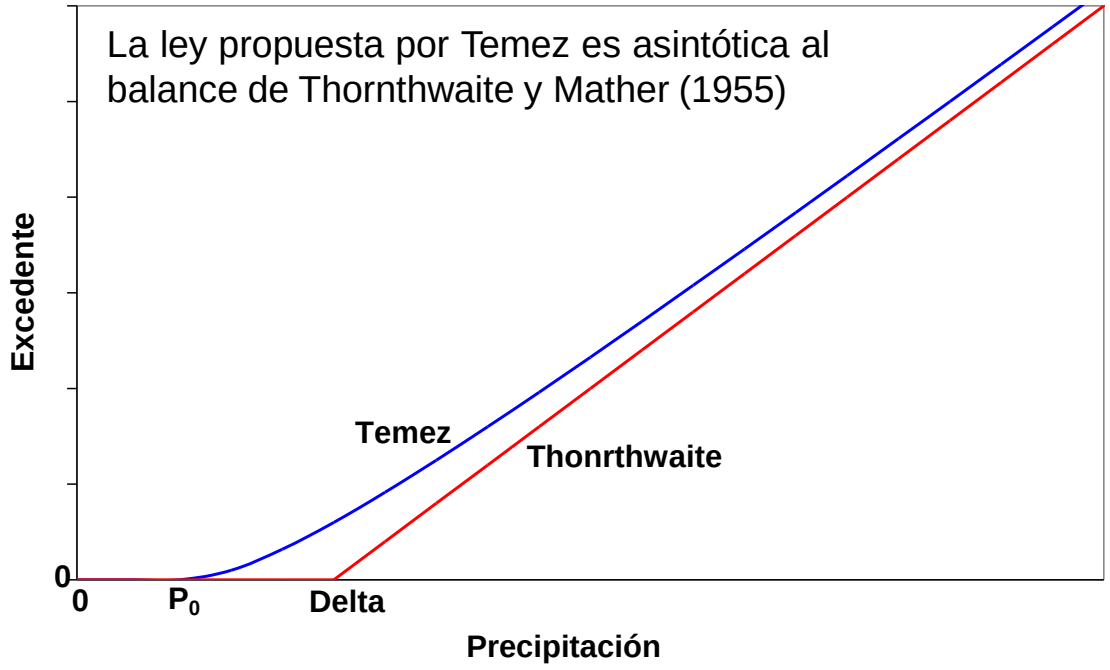
Parámetros del modelo

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores

Cálculo del excedente (T):



El modelo de Temez se ajusta mejor al régimen de lluvias de Uruguay (la lluvia no es uniforme a lo largo del mes)

Modelo Temez:

$$T_i = 0 \qquad si\ P_i \le P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2\,P_{oi}} \qquad si\ P_i > P_{oi}$$

Modelo Thornthwaite and Mather:

$$T_i = 0 \qquad si\ P_i \le \delta_i$$

$$T_i = P_i - \delta_i \qquad si\ P_i > \delta_i$$

siendo:

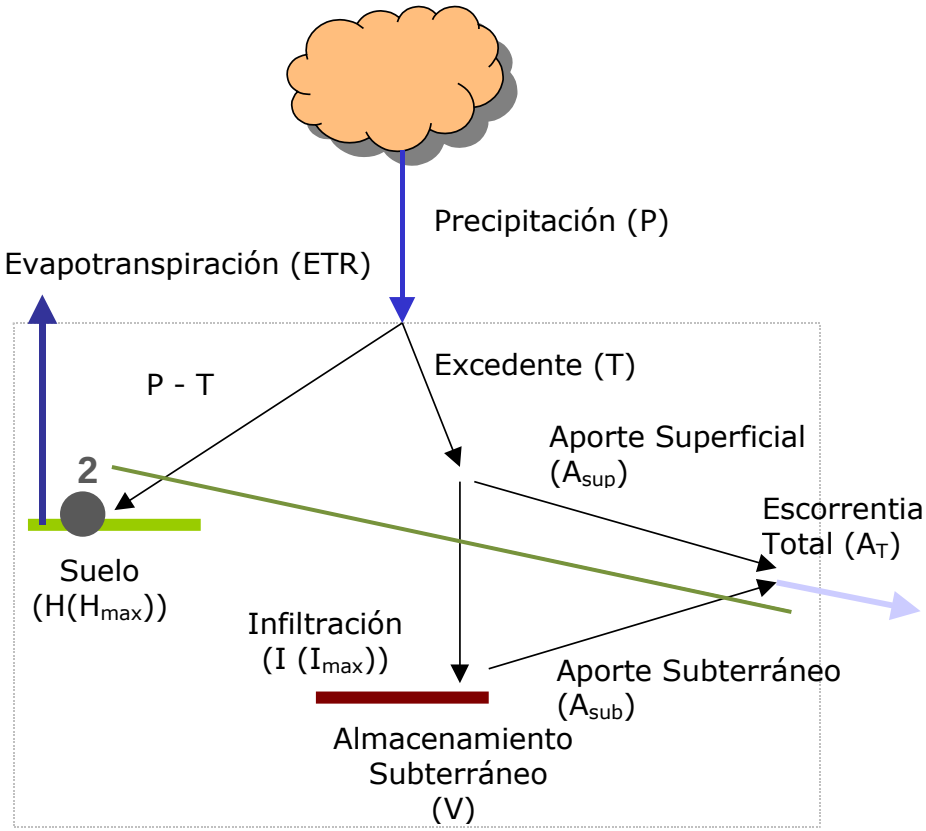
$$\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$$

$$P_{oi} = CPo\ (H_{\max} - H_{i-1})$$

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



La prioridad de uso del agua la tiene la ETP.

Balance en el suelo

Humedad de la capa superior del suelo al final del periodo:

$$H_i = \mathrm{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i)$$

$$H_i = \mathrm{Min}(H_i, Hmax)$$

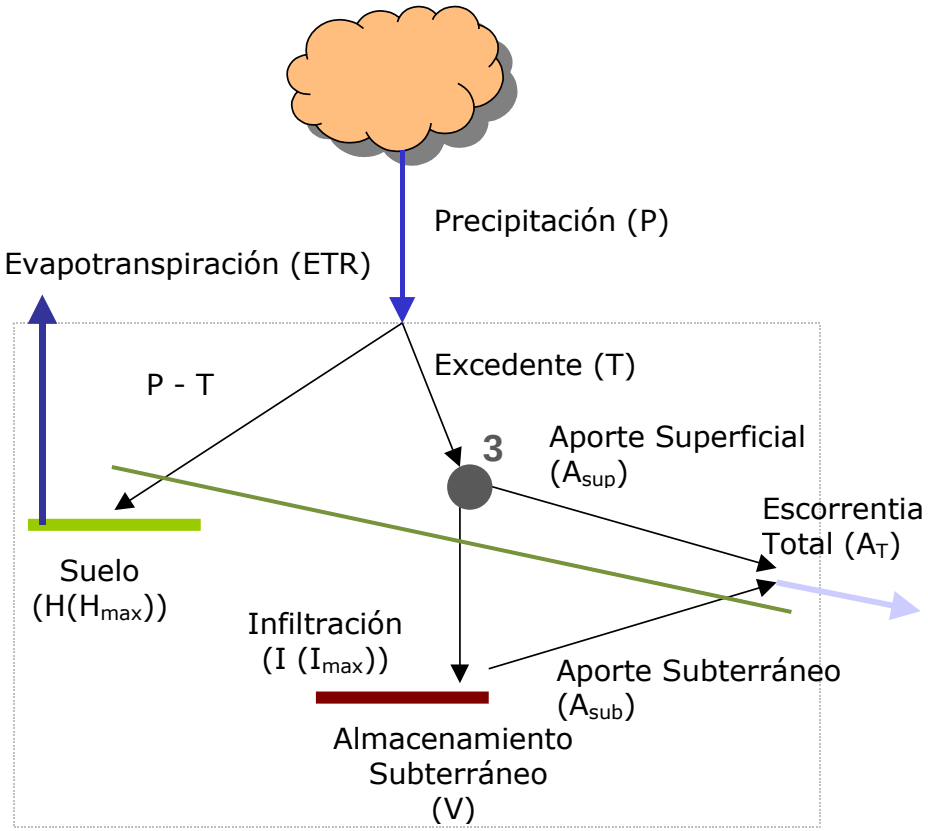
Demanda de evapotranspiración:

$$ETR_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i)$$

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



La percolación (I) aumenta con el excedente, pero tiene como asíntota horizontal a Imax.

Percolación/Infiltración

Percolación hacia la capa inferior del suelo (almacenamiento subterráneo):

$$I_i = I_{max} \frac{T_i}{T_i + I_{max}}$$

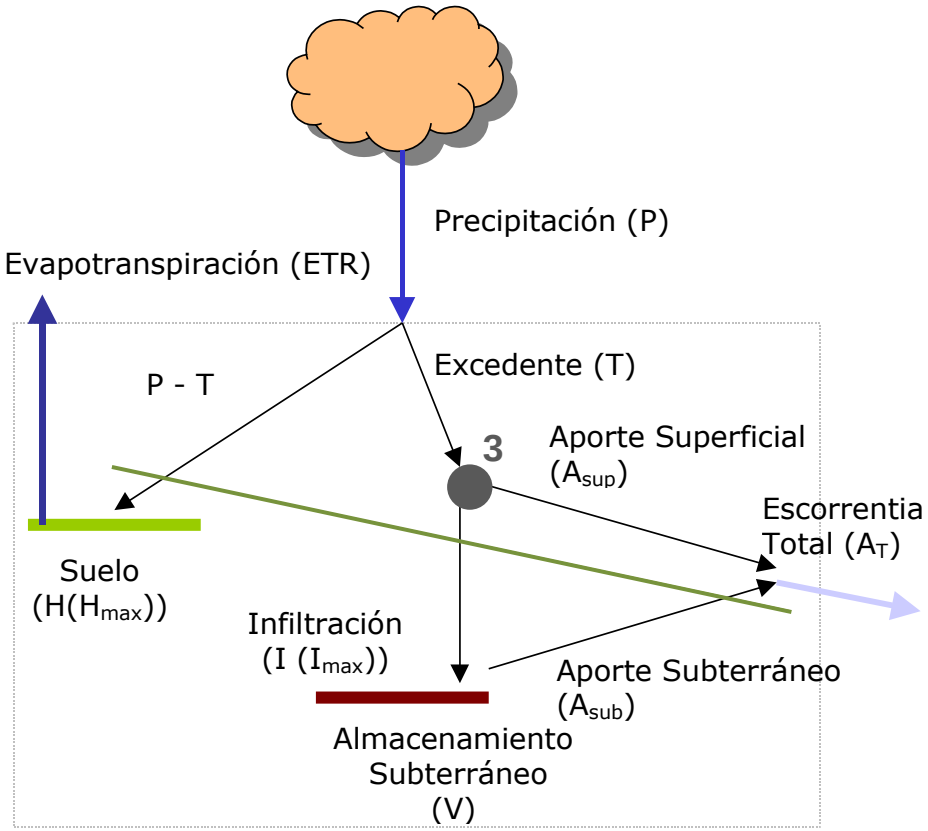
Aporte superficial:

$$A_{sup\,i} = T_i - I_i$$

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



La percolación (I) aumenta con el excedente, pero tiene como asíntota horizontal a Imax.

Imax: Infiltración máxima del suelo.

Percolación/Infiltración

Percolación hacia la capa inferior del suelo (almacenamiento subterráneo):

$$I_i = I_{max} \frac{T_i}{T_i + I_{max}}$$

Aporte superficial:

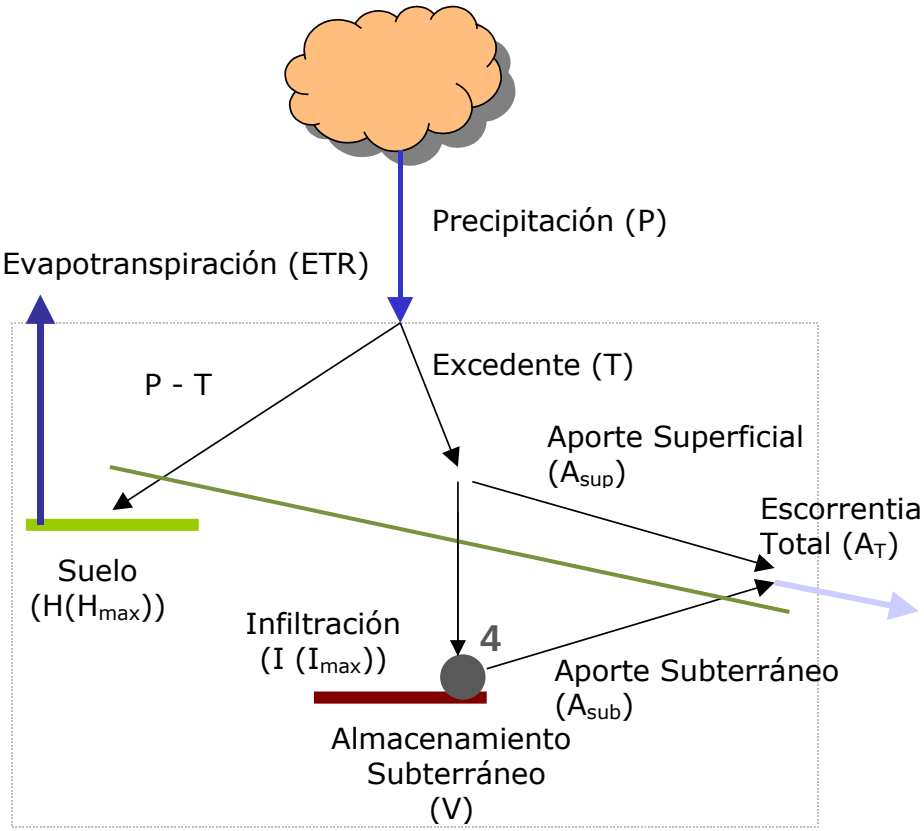
$$A_{sup\,i} = T_i - I_i$$

Tercer parámetro del modelo

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



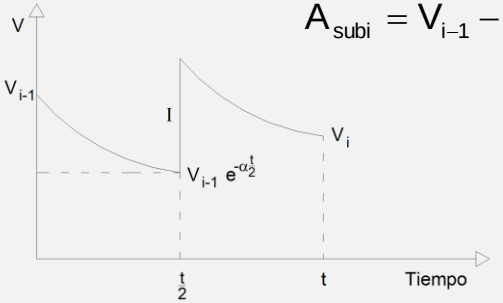
Aporte subterráneo

Almacenamiento subterráneo:

$$\begin{cases} Q_i = \alpha V_i \\ \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - Q_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + I_i \cdot e^{\frac{-\alpha t}{2}} \\ Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + \alpha \cdot I_i \cdot t \cdot e^{-\alpha t} \end{cases}$$

Aporte subterráneo:

$$A_{subi} = V_{i-1} - V_i + I_i$$



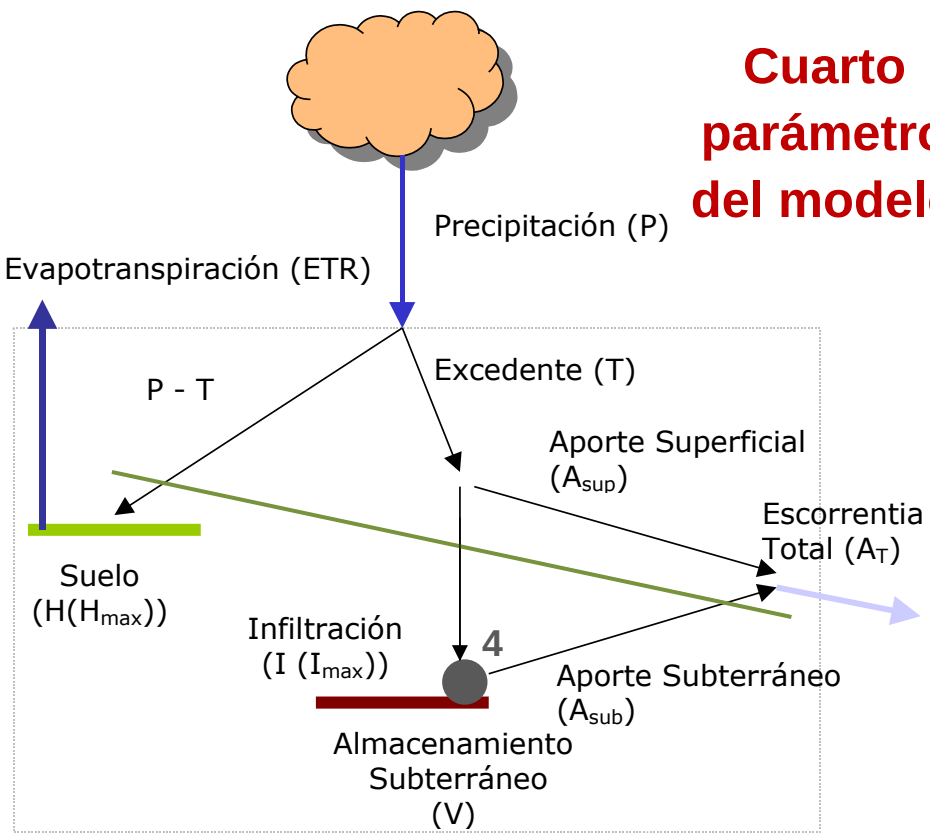
Se asume que la percolación (I) ingresa concentrada en la mitad del mes.

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores

α: Coeficiente de proporcionalidad entre el volumen almacenado y el caudal de aporte del almacenamiento subterráneo.



Cuarto parámetro del modelo

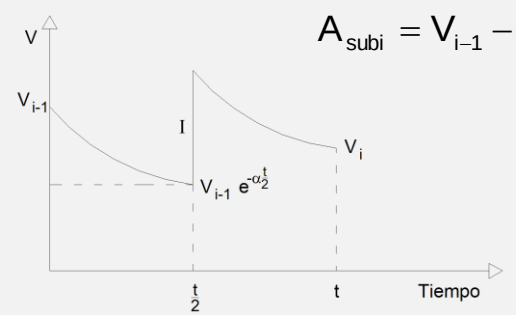
Aporte subterráneo

Almacenamiento subterráneo:

$$\begin{cases} Q_i = \alpha V_i \\ \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - Q_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + I_i \cdot e^{\frac{-\alpha t}{2}} \\ Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + \alpha \cdot I_i \cdot t \cdot e^{-\alpha t} \end{cases}$$

Aporte subterráneo:

$$A_{subi} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

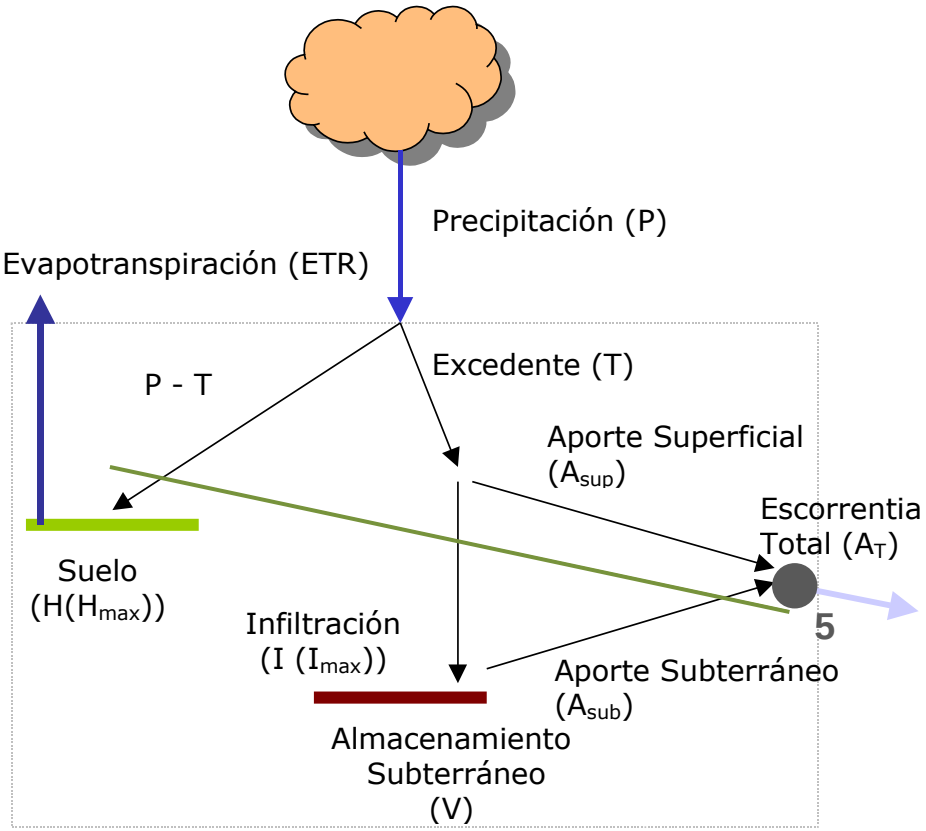


Se asume que la percolación (I) ingresa concentrada en la mitad del mes.

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



Escorrentía total

Aporte Superficial:

$$A_{sup\,i} = T_i - I_i$$

Aporte Subterráneo:

$$A_{sub\,i} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

Escorrentía Total:

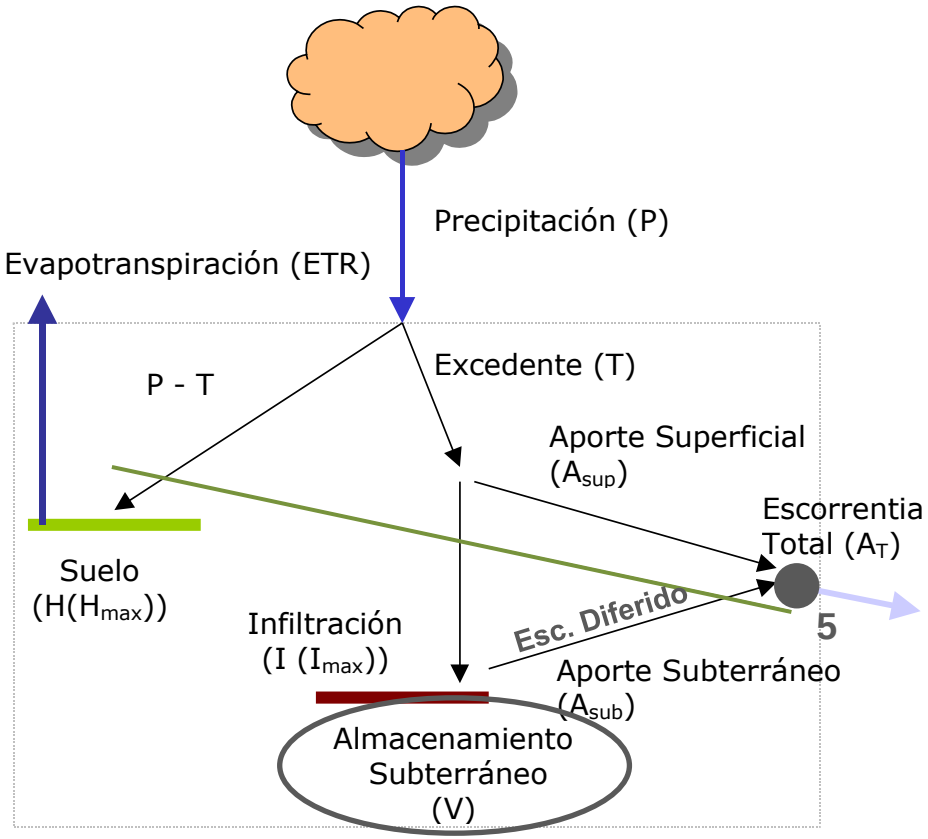
$$A_{T_i} = A_{sup_i} + A_{sub\,i}$$

$$\boxed{A_T = T + V_{i-1} - V_i}$$

MODELO DE TEMEZ

Estructura del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores



Escorrentía total

Aporte Superficial:

$$A_{sup\,i} = T_i - I_i$$

Aporte Subterráneo:

$$A_{sub\,i} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

Escorrentía Total:

$$A_{T_i} = A_{sup_i} + A_{sub\,i}$$

$$\boxed{A_T = T + V_{i-1} - V_i}$$

El almacenamiento subterráneo funciona como un sistema que traslada agua precipitada un mes a escurrimiento de los meses siguientes, generando escurrimientos lentos o diferidos.

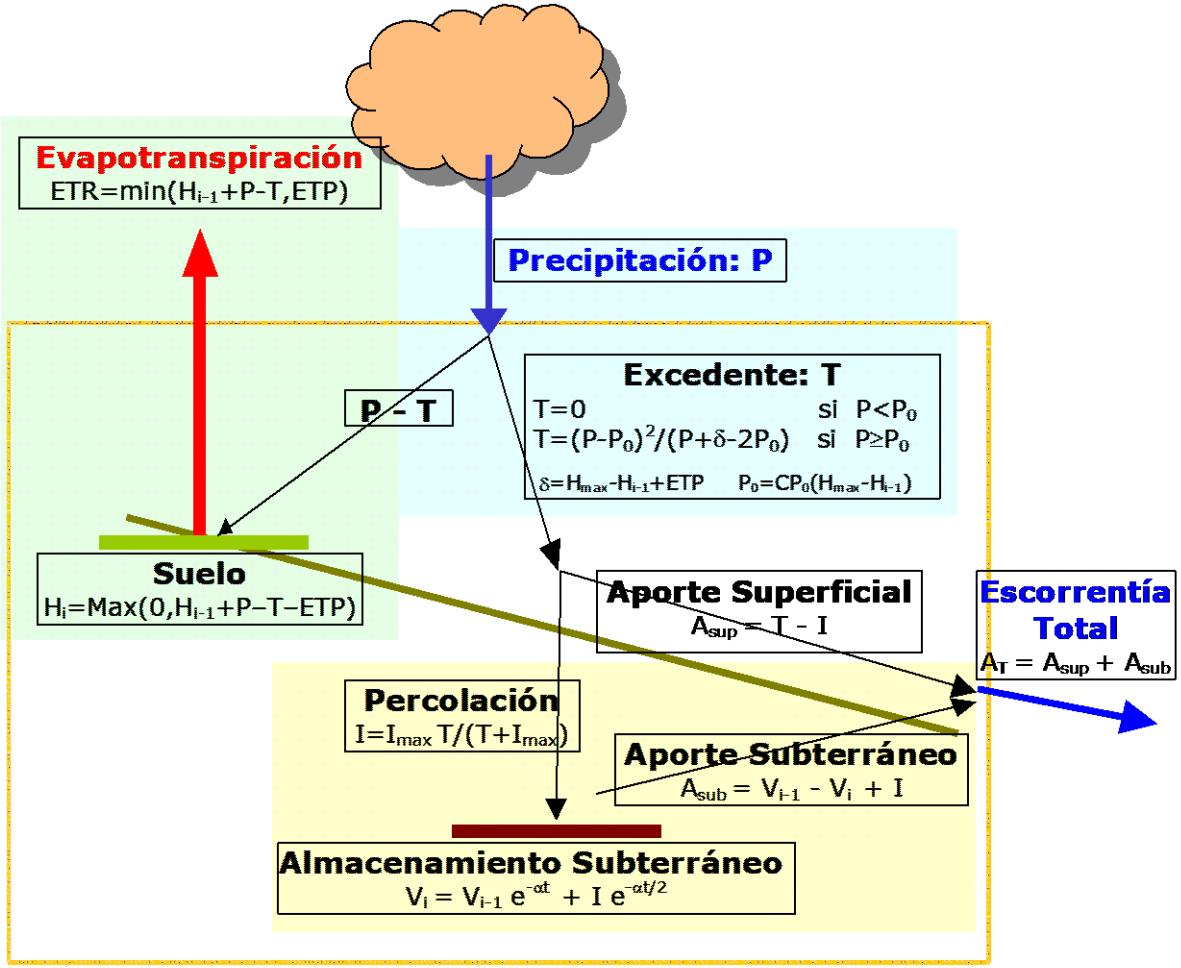
MODELO DE TEMEZ

Esquema matemático del modelo

Temez J.R. (1977) y posteriores

Parámetos del modelo:

Hmax, CPo, Imax y α.



MODELO DE TEMEZ

Ejemplo de cálculo

Determinar el volumen de escurrimiento (expresado en Hm^3) para un determinado mes en una cuenca de 1500 ha, dados:

- Precipitación de 146 mm/mes
- Evapotranspiración potencial de 137 mm/mes
- Condiciones de humedad antecedente del suelo:
  - H_{i-1} = 50 mm
  - V_{i-1} = 8 mm

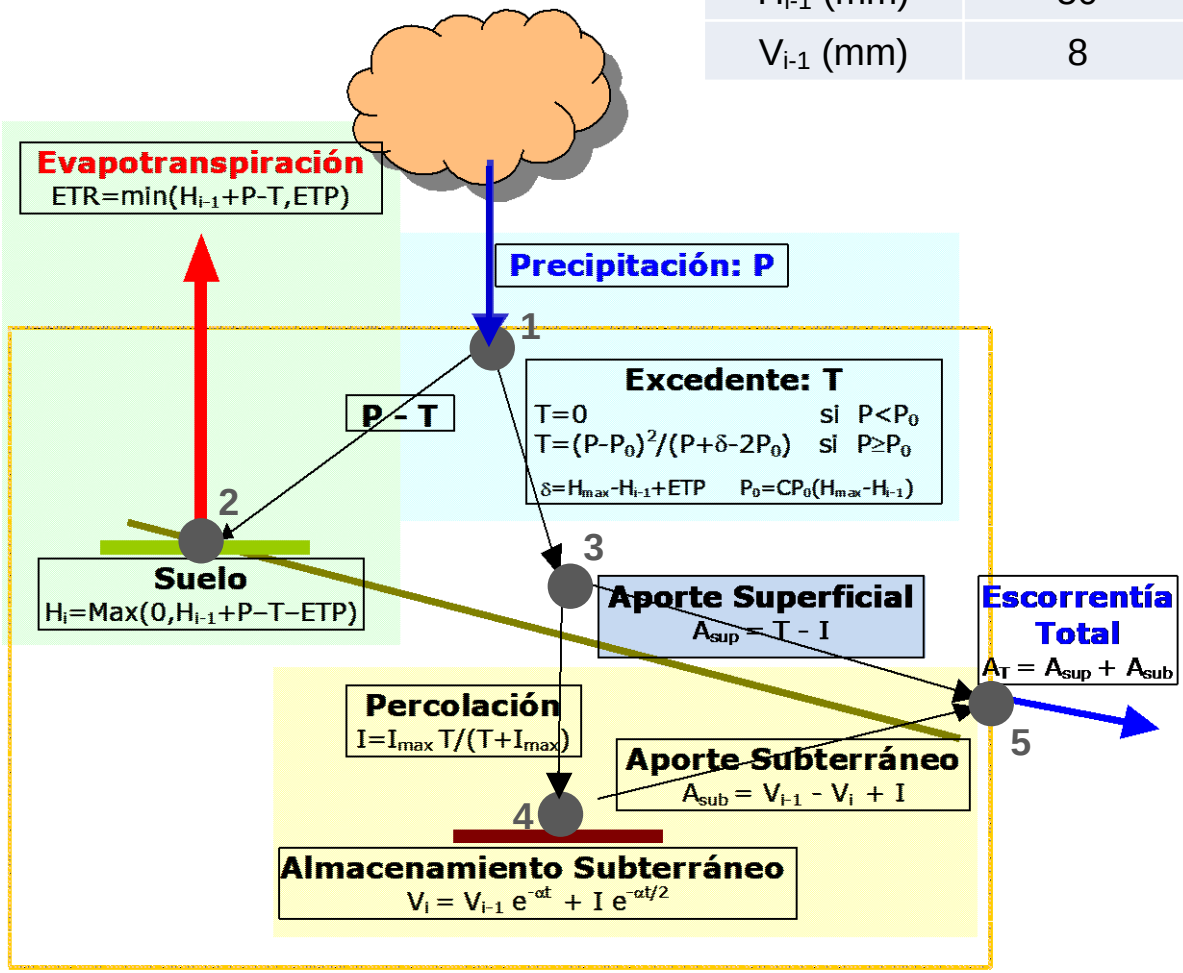
Para ello, considerar los valores de los parámetros regionalizados para Uruguay (presentados en las siguientes slides).

MODELO DE TEMEZ

Ejemplo de cálculo

Condición antecedente	
H_{i-1} (mm)	50
V_{i-1} (mm)	8

Parámetros	
H_{MAX} (mm)	87,4
CP_0	0,30
I_{MAX} (mm)	386
α (día^{-1})	0,0775



Variable (mm)	Valor	
P	146	
ETP	137	
P_0	11,2	
T	61,1	(1)
ETR	134,9	
H_i	0,0	(2)
I	52,7	
A_{sup}	**8,3**	(3)
V_i	16,6	
A_{sub}	**44,1**	(4)
Esc.Total	**52,5**	(5)
Vol. Esc (Hm^3)	**0,79**	

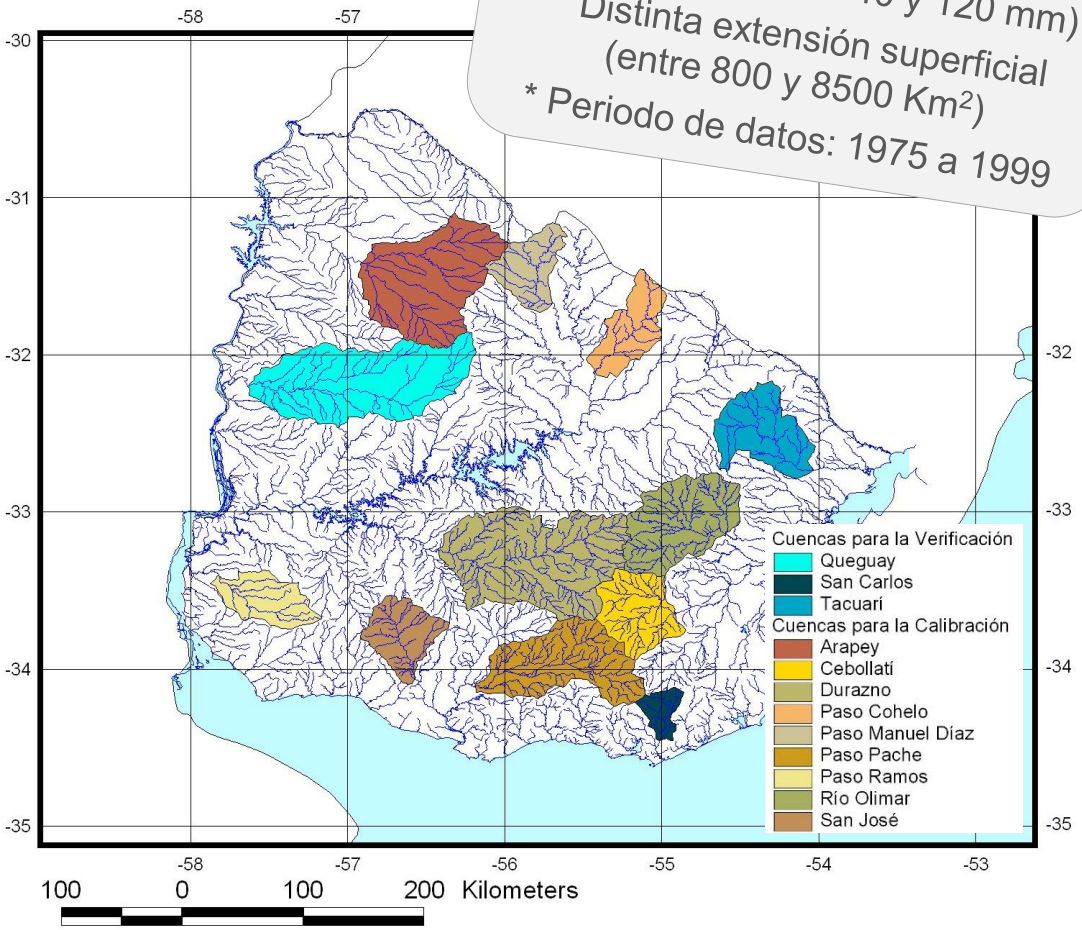
MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

Información de escurrimiento mensual de 12 cuencas aforadas por la DINAGUA

Estación	Area (Km^2)	AD (mm)
Arapey	6590	39
Cebollatí	2840	72
Durazno	8470	90
M.Díaz	2100	108
Olimar	4540	73
P. Cohelo	2300	104
P. Pache	4860	126
P.Ramos	2110	72
Queguay	7530	67
S. Carlos	790	108
S. José	2290	97
Tacuari	3260	72

* Uniformemente distribuidas: variaciones espaciales en P, ETP y suelos (AD entre 40 y 120 mm)
* Distinta extensión superficial (entre 800 y 8500 Km^2)
* Periodo de datos: 1975 a 1999



Genta et al., 2001.

MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

Se realizó en dos etapas:

1) CALIBRACIÓN INDIVIDUAL:

Un valor de la cuarteta de parámetros en cada cuenca

(Únicamente válidos en las cuencas donde fueron calibrados)

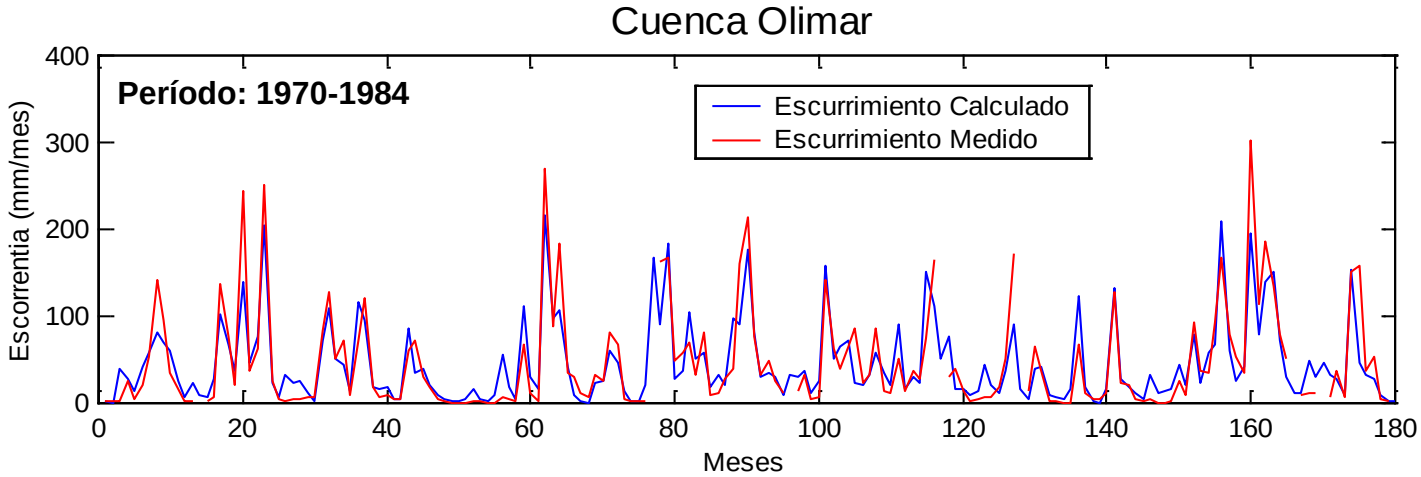
Función objetivo: NSE y ΔC

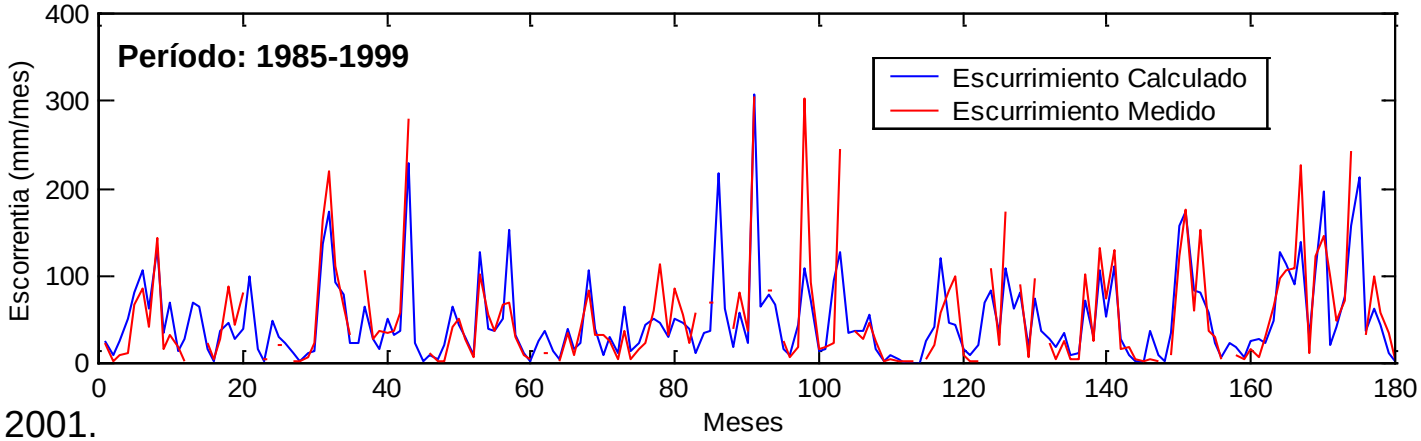
Genta et al., 2001.

MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

1) CALIBRACIÓN INDIVIDUAL:





Genta et al., 2001.

MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

Se realizó en dos etapas:

1) CALIBRACIÓN INDIVIDUAL:

Un valor de la cuarteta de parámetros en cada cuenca.

Únicamente válidos en las cuencas donde fueron calibrados.

OBJETIVO:

Disponer de una relación precipitación-escurrimiento en cualquier cuenca del país

CALIBRACION REGIONAL:

Parámetros válidos para todo Uruguay

MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

Se realizó en dos etapas:

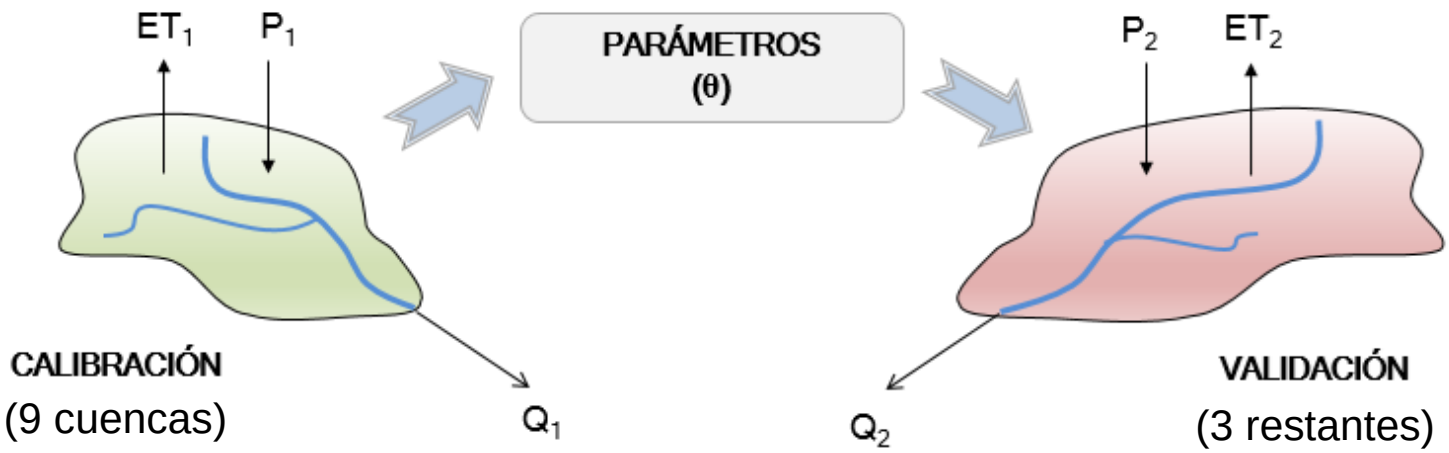
2) CALIBRACION REGIONAL:

Un valor de la cuarteta de parámetros para todo Uruguay

Se regionalizó el valor de: $H_{\max} = CAD * AD$

Calibración en 9 cuencas / Validación en las 3 restantes

Función objetivo: NSE y ΔC



Genta et al., 2001.

MODELO DE TEMEZ

Calibración del modelo en Uruguay

Se realizó en dos etapas:

2) CALIBRACION REGIONAL:

Un valor de la cuarteta de parámetros para todo Uruguay

Se regionalizó el valor de: $H_{\max} = CAD * AD$

Calibración en 9 cuencas / Validación en las 3 restantes

Función objetivo: NSE y ΔC

Parámetro	Valor calibrado
CAD	0.92
CPo	0.30
α (1/día)	0.0775
Imax (mm)	386

Genta et al., 2001.

MODELO DE TEMEZ

Aplicación a cuencas de Uruguay

DATOS NECESARIOS

- **Área de la cuenca de aporte**
  Ac Superficie de la cuenca de aporte (ha)

- **Precipitación mensual**
  Pi Precipitación en la cuenca (mm/mes)

- **Evapotranspiración Potencial**
  ETPi Ciclo anual medio de evapotranspiración potencial o serie temporal (mm/mes)

- **Agua disponible**
  AD Agua Disponible de los Suelos (mm)

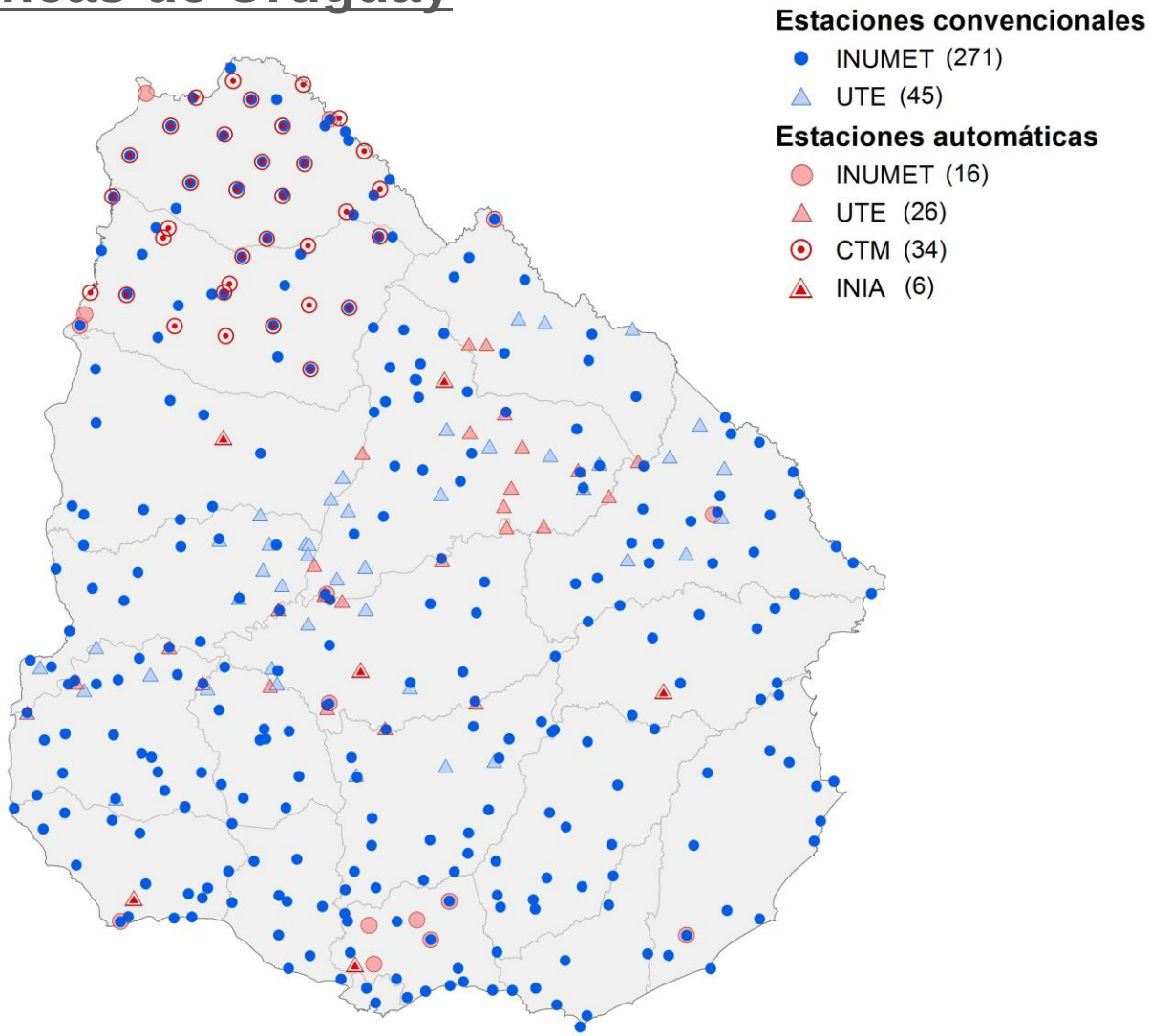
\+ **Parámetros del modelo (regionalizados)**

Hmax, CPo, Imax y α

MODELO DE TEMEZ

Aplicación a cuencas de Uruguay

PRECIPITACIÓN



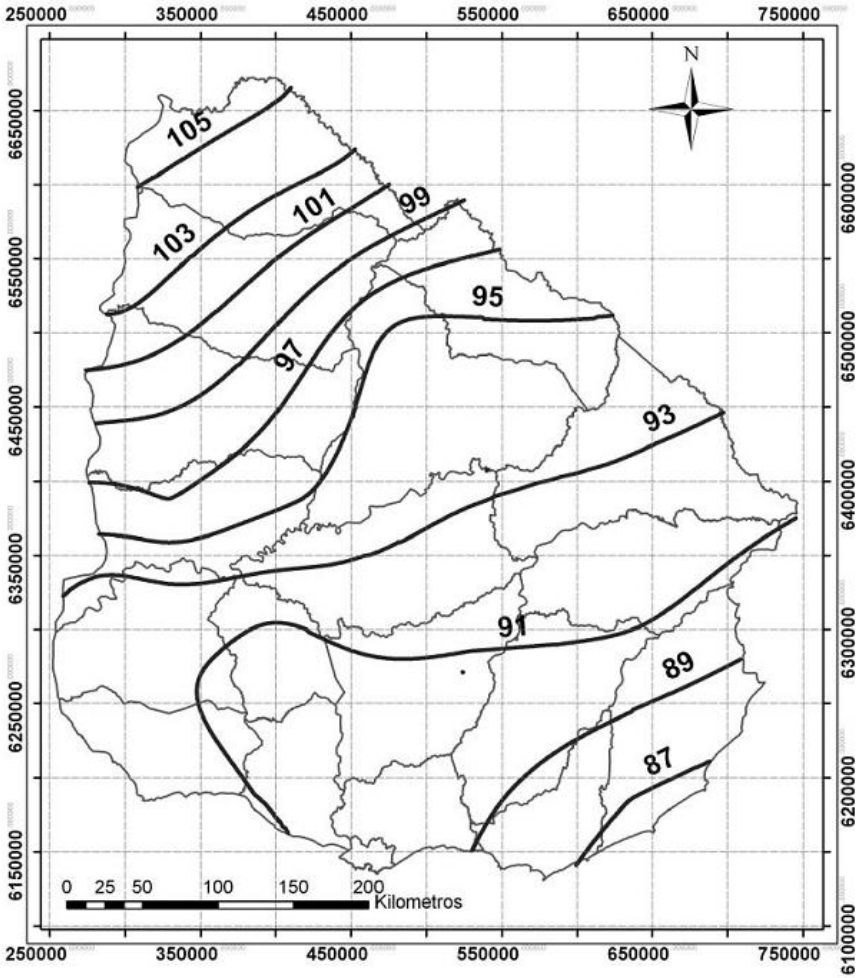
(*) Elaboración propia

MODELO DE TEMEZ

Aplicación a cuencas de Uruguay

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Isolíneas de ETP media anual (ETPm, mm/mes) y coeficientes de distribución del ciclo medio anual de ETP (ETPi/ETPm).



Sist. de coordenadas: Gauss Kruger Uruguay

Alta variación estacional y baja variación interanual de la ETP

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1.88	1.45	1.19	0.73	0.44	0.29	0.35	0.55	0.78	1.12	1.47	1.78

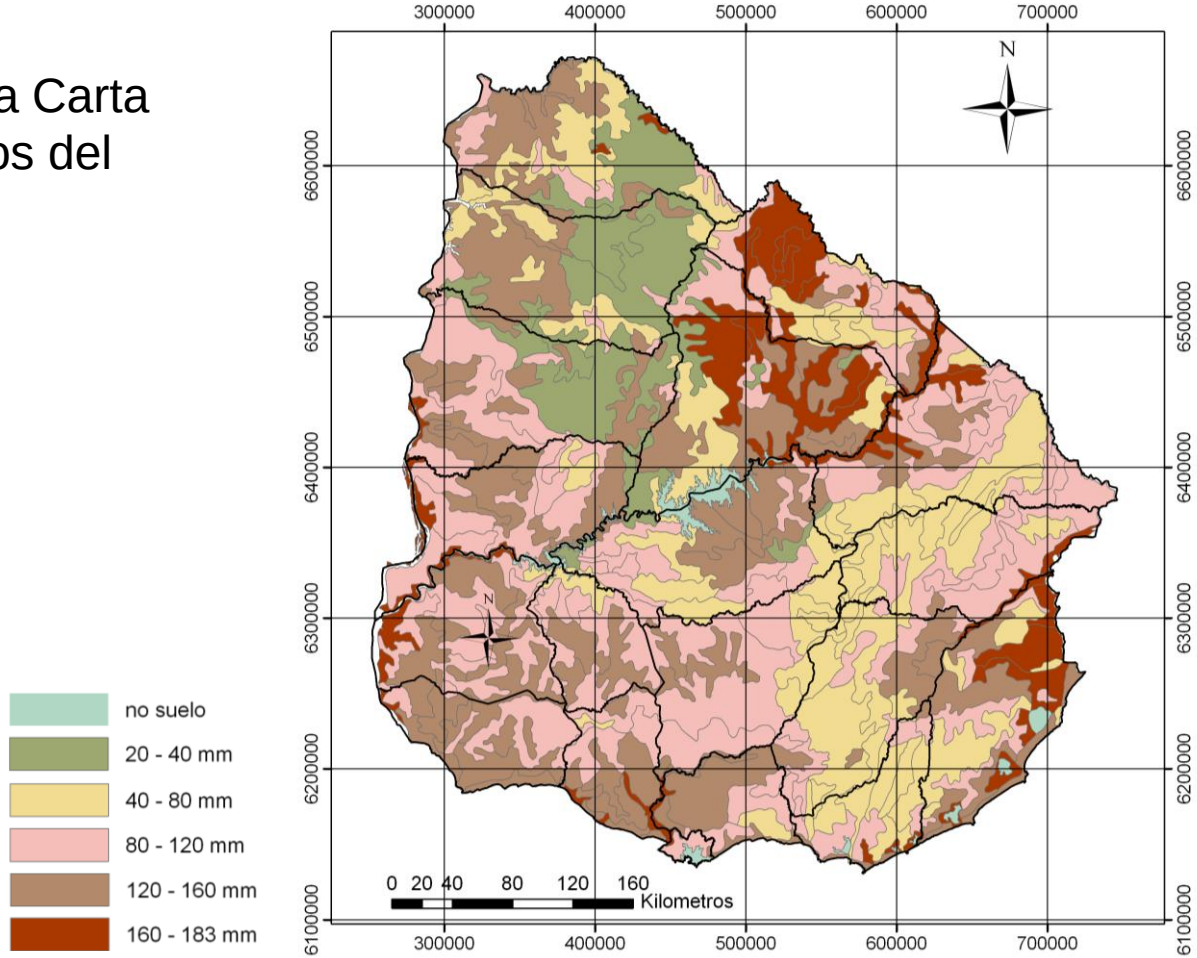
(*) Tomado de “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas”, MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011.

MODELO DE TEMEZ

Aplicación a cuencas de Uruguay

AGUA DISPONIBLE

Mapa elaborado en base a la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (CRSU)



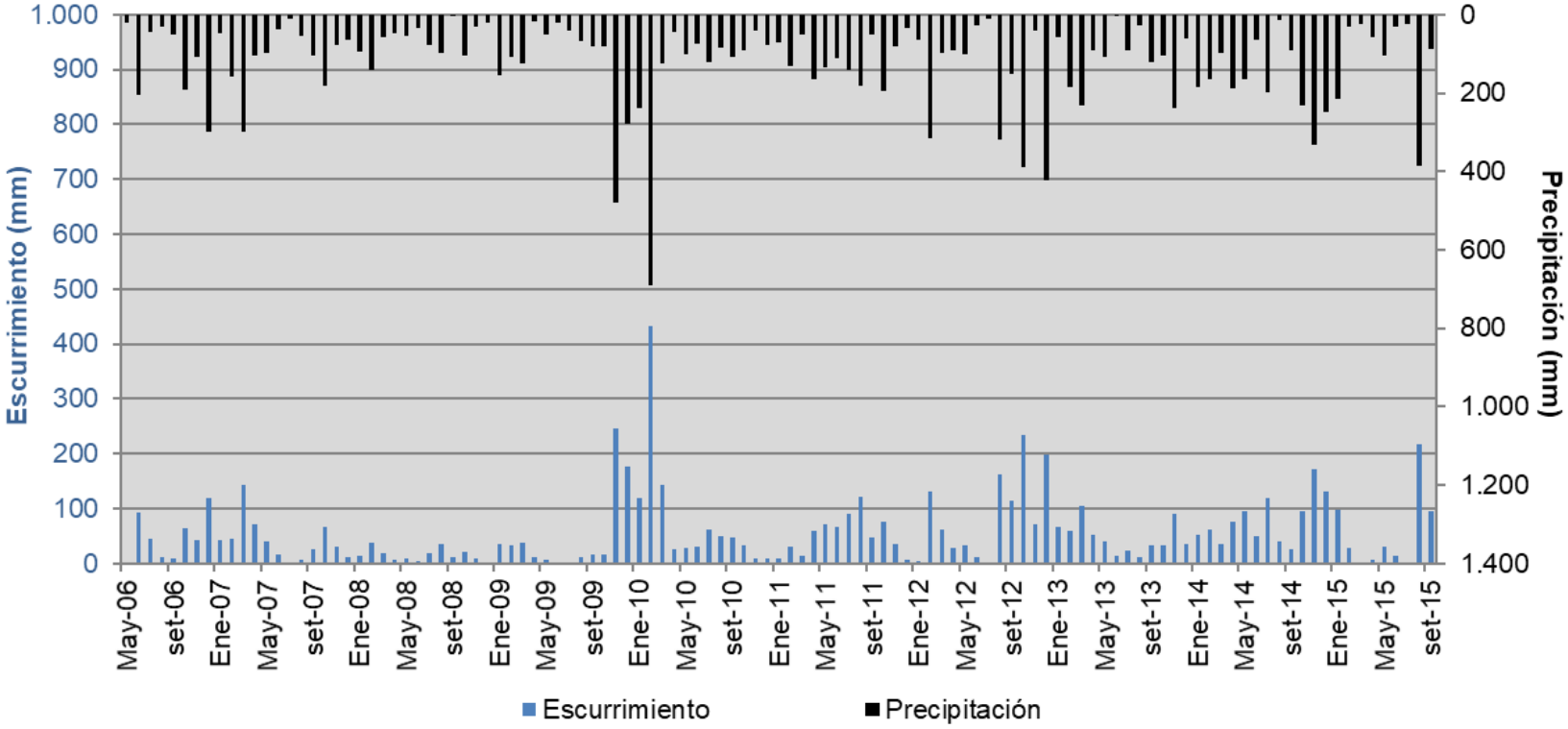
Sist. de coordenadas: Gauss Kruger Uruguay

(*) Tomado de Molfino y Califra (2001).

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

- Generación/Extensión/Relleno de series de escurrimiento a partir de series de precipitación



MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

- Precipitación (P), evapotranspiración (ETR) y escurrimiento (E) medio anual por cuenca Nivel 2 (1981-2012)

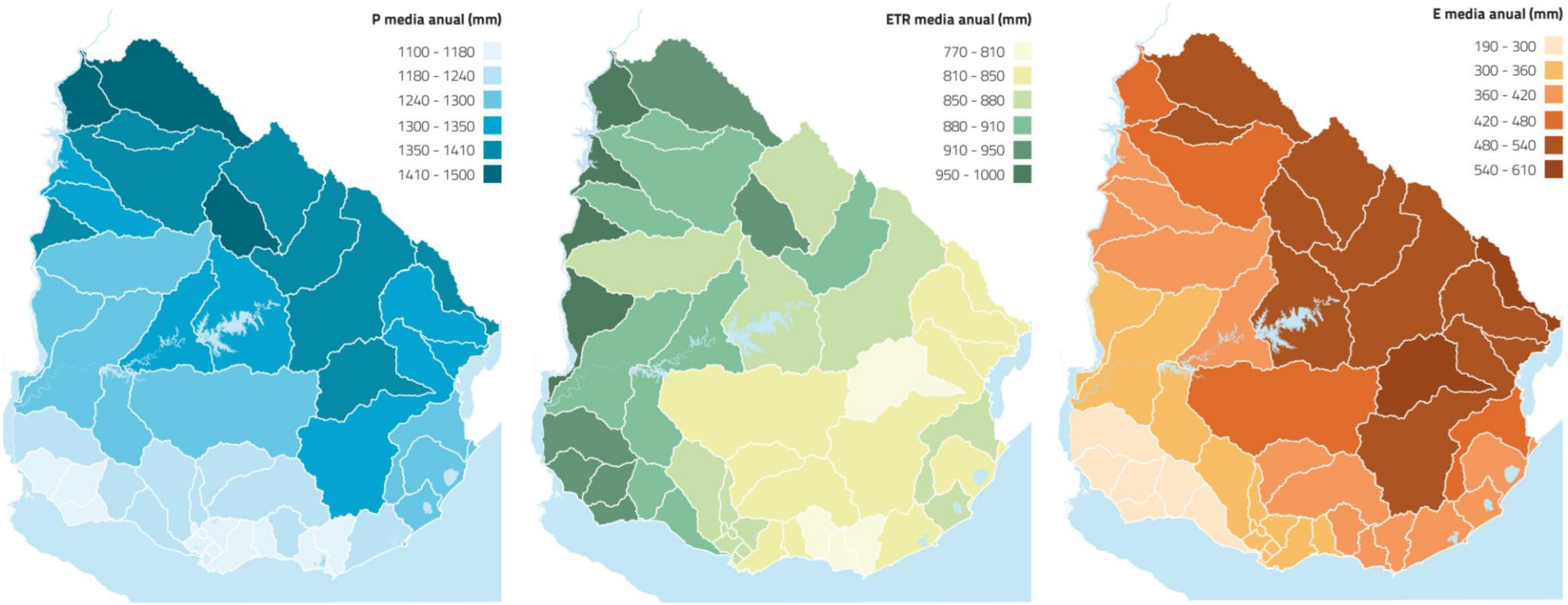


Figura 5.6 | Precipitación media anual (P), evapotranspiración (ETR) y escurrimiento (E) en mm por cuenca Nivel 2

Fuente: DINAGUA/INYPSA

(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

- Precipitación (P), evapotranspiración (ETR) y escurrimiento (E) medio anual por cuenca Nivel 2 (1981-2012)

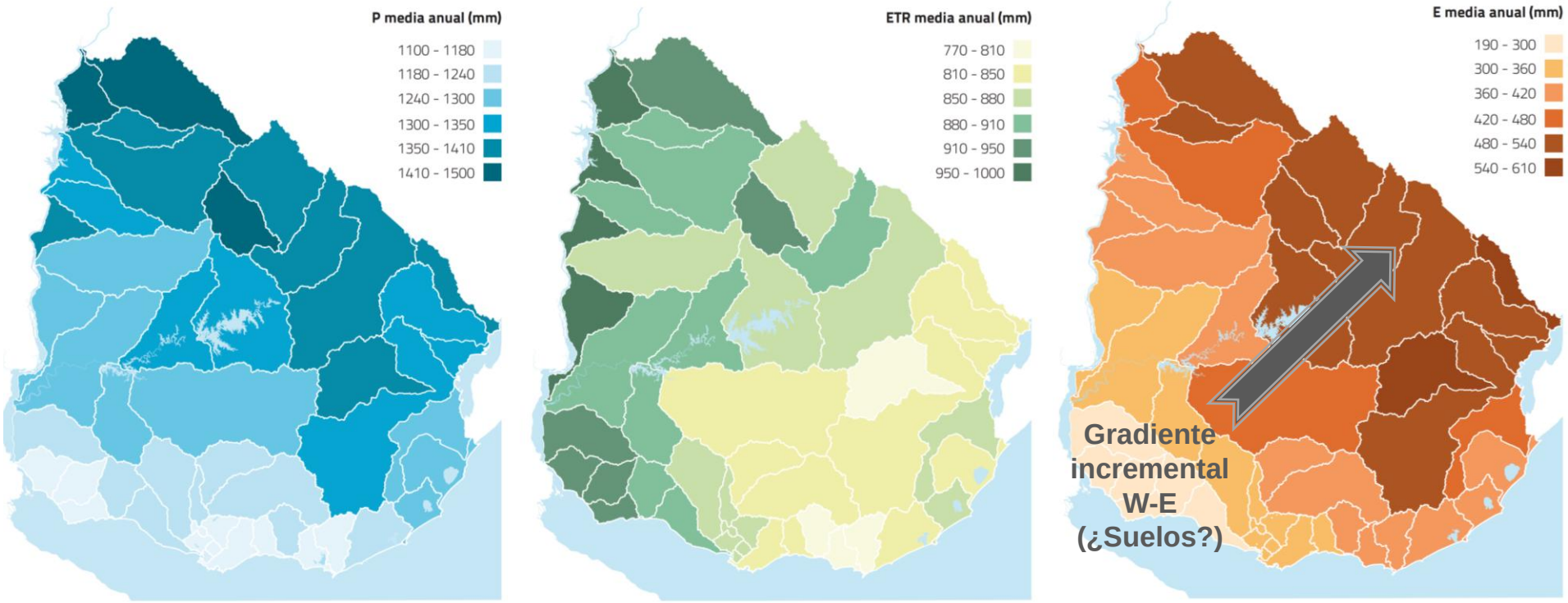


Figura 5.6 | Precipitación media anual (P), evapotranspiración (ETR) y escurrimiento (E) en mm por cuenca Nivel 2

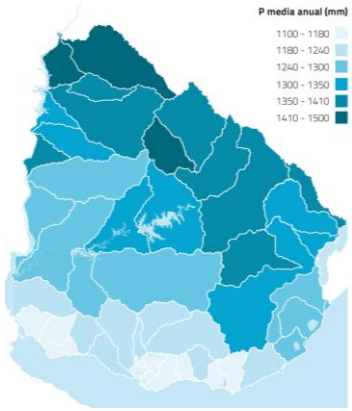
Fuente: DINAGUA/INYPSA

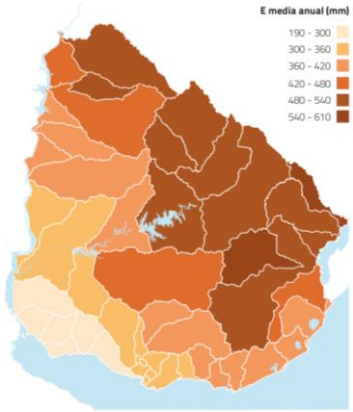
(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

❖ Coeficiente de escorrentía medio anual (1981-2012)





COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA:

$$C = \frac{Esc}{P} \approx 0.34$$

(Valor medio anual a nivel nacional)

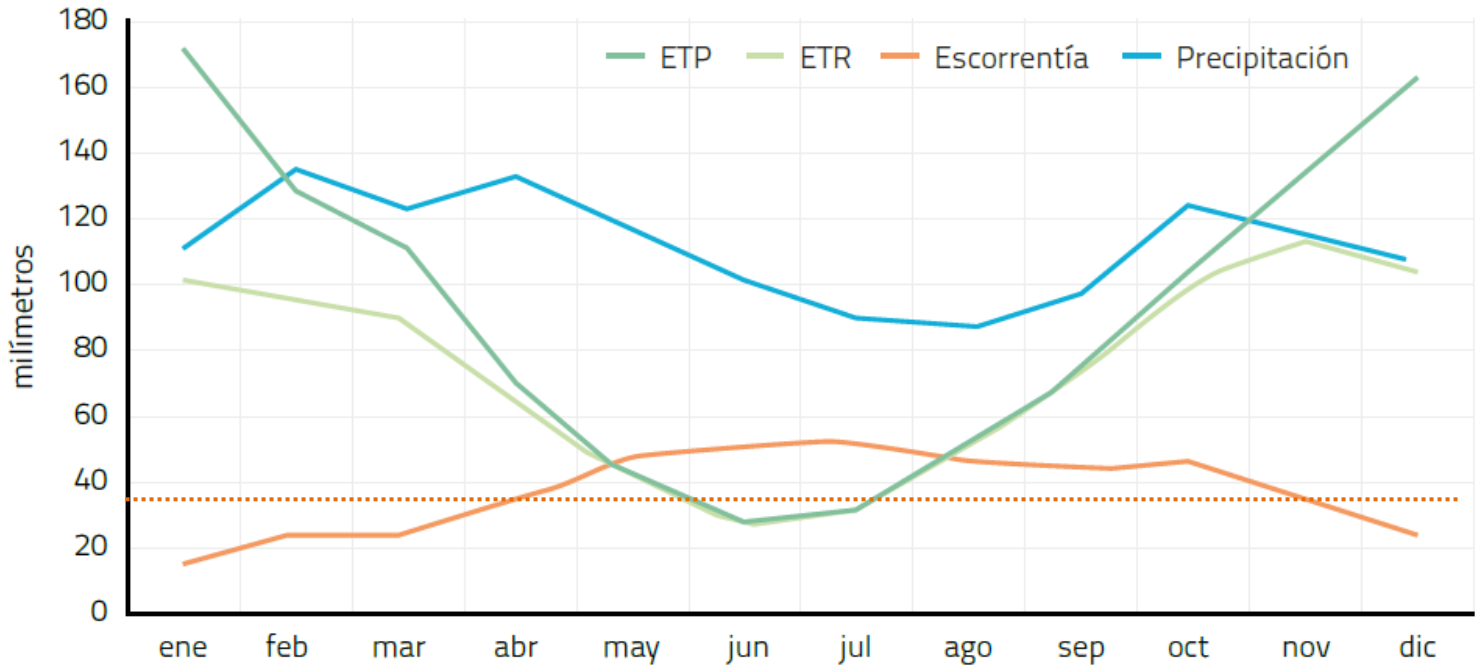
(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

Se diferencia un período con caudales medios iguales o superiores al promedio (Abril-Nov) y un período con caudales medios inferiores al promedio (Dic-Marzo).

- Cálculo de ciclos medios anuales en Uruguay (1981-2012)



Valor medio de escurrimiento anual: 37 mm

¿Dispersión?

Figura 5.5 | Distribución mensual de Precipitación, ETP, ETR y Escorrentía (mm) | Fuente DINAGUA/INYPSA. Datos período 1987 a 2012

(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

- Variabilidad
  - Las figuras anteriores describen los **comportamientos promedios** de las variables hidrometeorológicas.
  - En **distintas escalas de tiempo** se produce una **variabilidad natural** en torno a dichos promedios que se expresa en términos interanuales, estacionales, intra-estacionales (menos de 60 días), etc.

(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Variabilidad estacional: Hay cuencas en el Este del país con esc. medio anual de 40-45 mm/mes, que en verano se reduce a menos de 20 mm/mes.

Resultados obtenidos de su aplicación

❖ Variabilidad

Esc. Medio Anual **Esc. Medio Verano (Dic-Mar)**

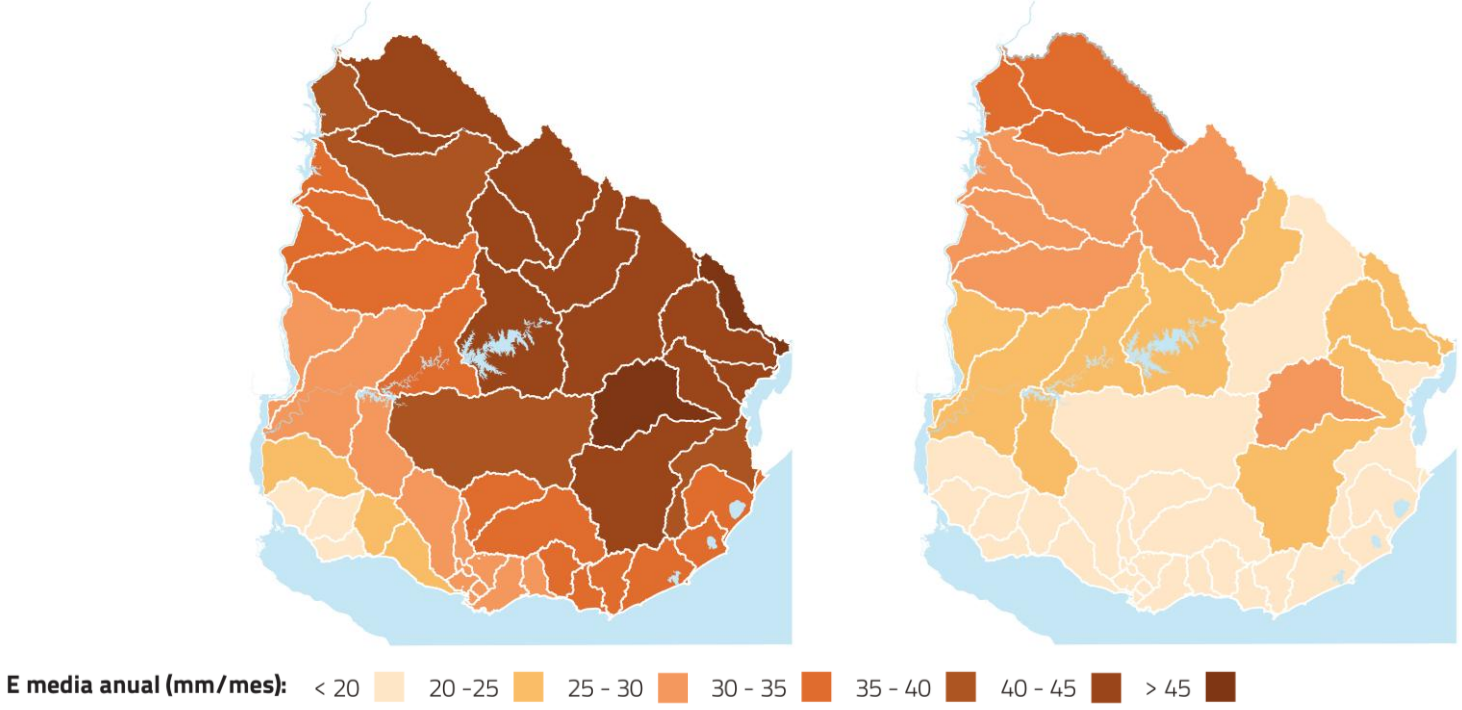


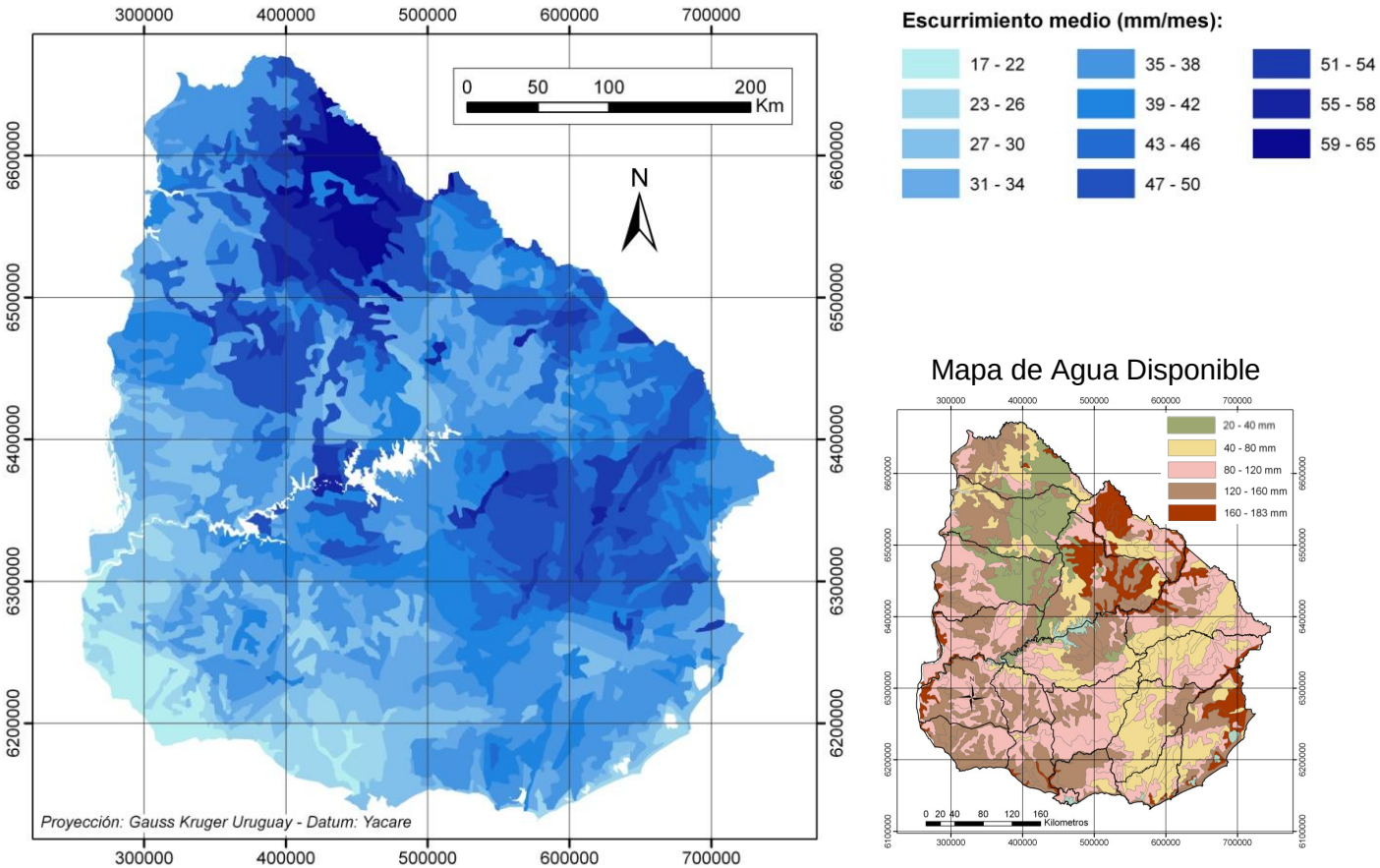
Figura 5.7 | Escurrimientos calculados en mm/mes

(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 5: “Recursos hídricos”.

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

❖ Mapa de escorrentía media mensual



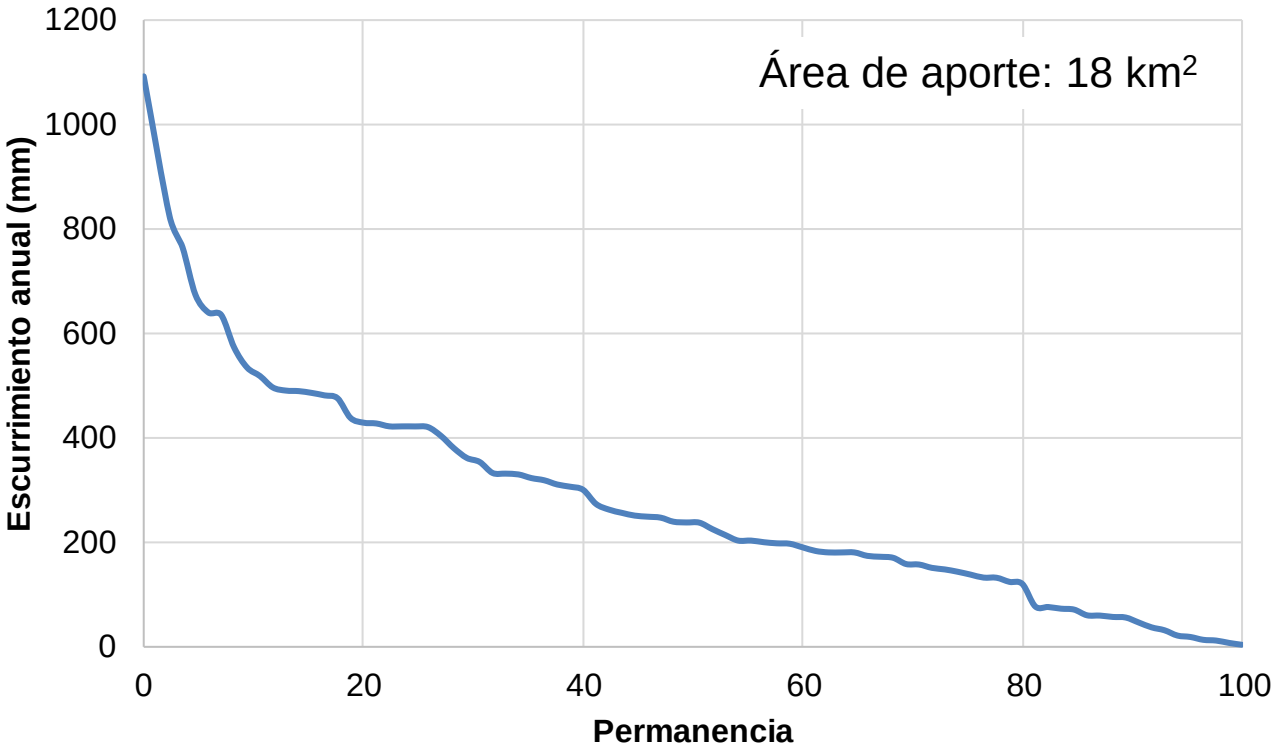
Mapa de Agua Disponible

(*) Tomado de “Monitoreo y disponibilidad de recursos hídricos en Uruguay”, Genta y Failache (DINASA, 2010).

MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

- Curva de permanencia de caudales



MODELO DE TEMEZ

Resultados obtenidos de su aplicación

❖ Evaluación de escenarios

10.1 | Escenarios hidroclimáticos

En base a los resultados presentados en el capítulo Variabilidad y Cambio Climático, considerando la importancia de comprender la variabilidad climática actual y mejorar la capacidad de adaptación para afrontar cambios climáticos futuros, se toman los siguientes escenarios:

E0 | Precipitación (P) y Evapotranspiración potencial (ETP actual)

E1 | Precipitación resultante incrementando un 5 % el valor actual (P actual + 5 %) y manteniendo ETP actual (ETP actual)

E2 | Precipitación resultante disminuyendo un 5 % el valor actual (P actual - 5 %) y manteniendo ETP actual (ETP actual)

E3 | Precipitación actual (Pact) y ETP actual incrementada un 10 % (ETP actual + 10 %)

Para la generación de escenarios se simularon series sintéticas de 100 años a partir de una serie de datos históricos de 30 años de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP).

Con las series sintéticas mensuales de 100 años de precipitación y de ETP se simula el modelo de Témez con los parámetros que se obtuvieron en el balance hídrico superficial, obteniéndose las series de aportaciones y de evapotranspiración real (ETR) anuales a nivel nacional, que se resumen en la siguiente tabla 10.1. Para los escenarios **E0**, **E1**, **E2** y **E3** se presenta la proporción del valor anual de la ETR y la escorrentía y la distribución mensual de la precipitación, ETP, ETR y escorrentía (figura 10.3), respectivamente para cada escenario. En el caso del escenario actual (E0) estos datos se presentan con mayor detalle en el capítulo Recursos Hídricos.

El balance hídrico se realizó además para cada una de las 314 cuencas de Nivel 3 a efectos de su utilización para evaluar el posible déficit y permitir simular la asignación local de las aguas.

Variable	E0 - serie 1981 - 2012	E1	E2	E3
Precipitación (mm)	1.310,8	1.508,2	1.095,6	1.293,2
ETP (mm)	1.085,3	1.075,9	1.076,0	1.184,6
ETR (mm)	871,4	9.54,9	848,1	948,6
Escorrentía (mm)	439,4	554,1	247,9	345,2
Aportación (m^3/s)	2.457,7	3.101,1	1.386,5	1.930,7
Q específico ($l/s\text{-}km^2$)	13,9	17,6	7,9	10,9
Aportación total (hm^3/s)	**77.507,1**	**97.795**	**43.724,6**	**60.886,2**

Tabla 10.1 | Componentes anuales del balance hídrico superficial para el territorio de Uruguay de la serie histórica 1981-2012 y para los escenarios considerados | Fuente: DINAGUA-INYPSA

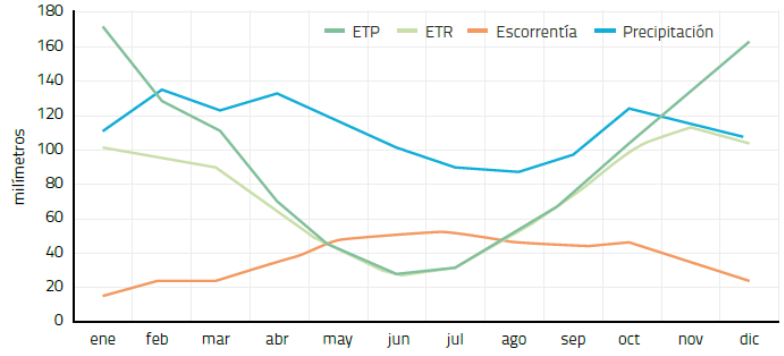
(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 10: “Proyecciones y asuntos críticos”.

MODELO DE TEMEZ

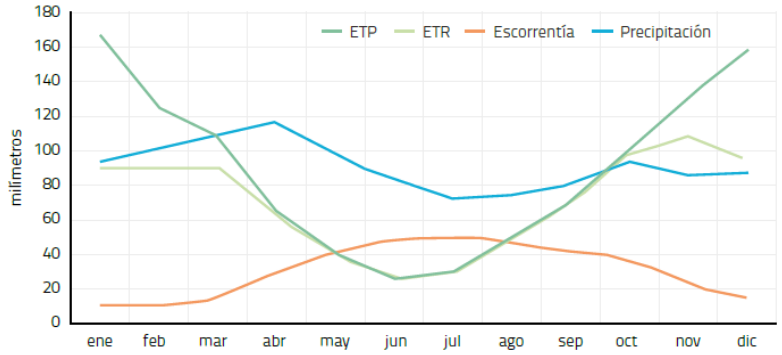
Resultados obtenidos de su aplicación

❖ Evaluación de escenarios

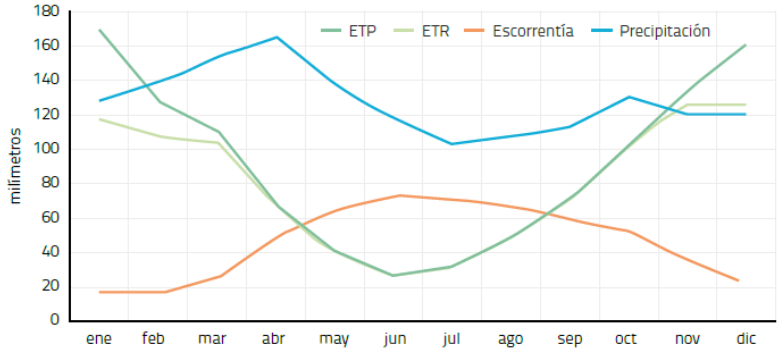
E0: Actual



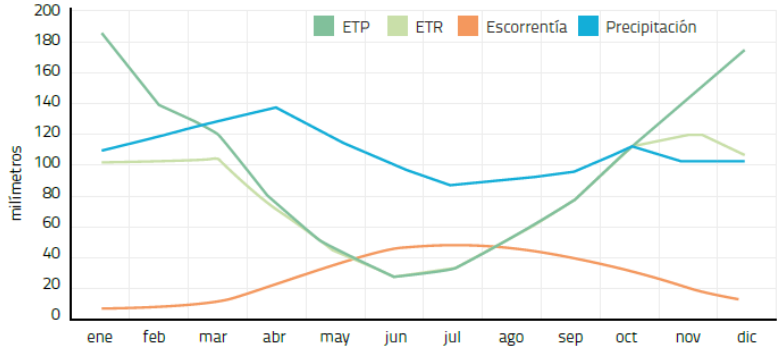
E2: P-5%, ETP actual



E1: P+5%, ETP actual



E3: P actual, ETP+10%



(*) Tomado del “Plan Nacional de Aguas” (2017), Capítulo 10: “Proyecciones y asuntos críticos”.

MODELO DE TEMEZ

Aplicación en Uruguay

- **PEQUEÑAS PRESAS:** Modelo “oficial” para el cálculo de los volúmenes de escurrimiento de la cuenca de aporte al embalse (MVOTMA-DINAGUA)

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA DE APORTE

según A.6 **MODELO PRECIPITACIÓN ESCURRIMIENTO (TEMEZ 1977)**

Planilla complementaria al Manual de diseño y construcción de pequeñas presas, Versión 1.04, del 01/04/2013 — Presa del Ejemplo del Manual

Agua Disponible según las Unidades de Suelos de la cuenca neta y sus áreas:

Unidad Cartográfica seg/ Carta de Recon. Suelos del Uruguay	Área	AD *	
Cuchilla de Haedo – Paso de Los Toros	2559	21,5	mm
Masoller	71	52,1	mm
0	0	0	mm
0	0	0	mm
Àrea de Cuenca y Agua Disponible "AD" ponderada:	2630	22,3	mm

* Agua Disponible s/Cuadro 2.1 o Mapa 2.2

Columna		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
i		ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	Ii	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3
							0				0			
1981	1	190,1	137,4	210,52	6,14	51,33	0,00	86,07	45,31	6,03	14,17	31,14	37,17	0,98
1981	2	146,6	186,1	167,05	6,14	95,01	0,00	91,09	76,24	18,77	25,23	65,19	83,95	2,21
1981	3	120,3	66,0	140,76	6,14	18,43	0,00	47,57	17,59	0,84	7,97	34,85	35,69	0,94
1981	4	73,8	48,0	94,26	6,14	13,48	0,00	34,52	13,03	0,46	4,85	16,14	16,60	0,44
1981	5	44,5	256,4	64,94	6,14	202,65	9,27	44,48	132,89	69,76	42,03	95,71	165,47	4,35
1981	6	29,3	96,8	40,51	3,36	66,86	9,88	29,32	56,99	9,87	21,93	77,09	86,96	2,29
1981	7	35,4	66,1	45,95	3,17	37,46	3,14	35,39	34,15	3,31	12,82	43,26	46,57	1,22
1981	8	55,6	48,3	72,92	5,19	16,77	0,00	34,67	16,07	0,70	6,28	22,61	23,31	0,61
1981	9	78,9	95,2	99,31	6,14	43,53	0,00	51,67	39,12	4,41	12,85	32,55	36,96	0,97
1981	10	113,2	55,5	133,68	6,14	13,77	0,00	41,73	13,30	0,47	5,41	20,73	21,20	0,56
1981	11	148,6	121,3	169,07	6,14	47,69	0,00	73,61	42,45	5,24	13,80	34,06	39,30	1,03
1981	12	180,0	135,4	200,41	6,14	51,65	0,00	83,75	45,55	6,09	15,59	43,76	49,85	1,31
1982	1	190,1	70,4	210,52	6,14	15,37	0,00	55,03	14,78	0,59	6,15	24,23	24,82	0,65
1982	2	146,6	360,8	167,05	6,14	243,97	0,00	116,83	149,49	94,48	47,35	108,29	202,77	5,33
1982	3	120,3	29,1	140,76	6,14	3,35	0,00	25,75	3,32	0,03	5,67	45,00	45,03	1,18
1982	4	73,8	21,4	94,26	6,14	2,25	0,00	19,15	2,24	0,01	1,25	6,65	6,67	0,18

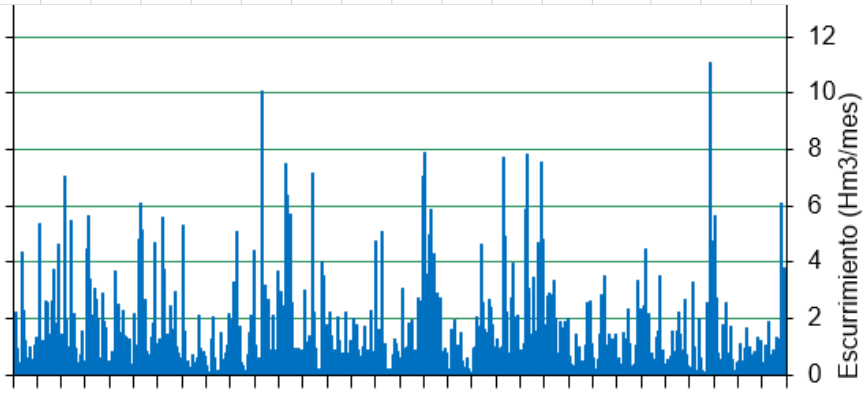
PARÁMETROS FIJOS PARA EL MODELO DE TEMEZ

Coeficientes de Distribución de la Evapotranspiración media mensual (según A.4)

Mes i	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Coefic. Dist	1,88	1,45	1,19	0,73	0,44	0,29	0,35	0,55	0,78	1,12	1,47	1,78

Parámetros propios del modelo, calibrados para pequeñas cuencas del Uruguay (Según A.1)

Parámetro de proporcionalidad del Agua Disponible en el suelo:	C_{AD}	0,9161	mm
Parámetro de la precipitación mínima para que exista escurrimiento:	CP.o	0,3	
Parámetro de descarga de infiltración máxima:	Imax	386	mm
Parámetros de descarga del almacenamiento subterráneo:	α	2,325	1/mes



Planilla complementaria al Manual de diseño y construcción de pequeñas presas, Versión 1.04, del 01/04/2013

(*) Planilla complementaria al “Manual de diseño y construcción de pequeñas presas”

MODELO DE TEMEZ

Algunos comentarios

- **Modelo simple** de transformación Precipitación-Escurrimiento, basado en una adecuada caracterización del funcionamiento hidrológico del suelo en la zona no saturada.
- Permite el pasaje de agua precipitada en un mes como escorrentía en el siguiente.
- Calibrado en base a escorrentía observada en 12 cuencas del país, utilizando el Agua Disponible para regionalización de sus parámetros.
- La **calibración** se realizó **para cuencas entre 800 y 8500 Km^2** de superficie, por lo que se verifica que el modelo representa bien los procesos hidrológicos asociados a dicha escala. En pequeñas y micro cuencas (inferiores a algunos pocos Km^2), los tiempos de respuesta son mucho menores y los procesos hidrológicos relevantes son otros, lo que puede generar mayor incertidumbre en los resultados del modelo.

MODELO DE TEMEZ

Algunos comentarios

- Aplicación del modelo de Temez para el **cálculo de la escorrentía anual** resulta ventajoso frente al cálculo habitual de asignación de un coeficiente de escorrentía. Para años de igual precipitación total acumulada, se obtienen resultados de escurrimiento anual diferentes en función de la distribución de las precipitaciones.

- Permite el **análisis cuantitativo del impacto** sobre la disponibilidad del recurso generado por:

  - Modificaciones en las condiciones de escurrimiento de una cuenca, como por ejemplo cambios en el uso el suelo, la implantación de embalses, obras de toma, trasvase de cuencas, etc.

  - Escenarios de cambio climático que afecten la magnitud/frecuencia de las precipitaciones y/o temperatura.

Bibliografía

- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. (1994). “Hidrología Aplicada”. McGraw-Hill. ISBN: 958-600-171-7.
- DINAGUA (2012). “Ciclos anuales y estacionales de parámetros hidrológicos” (1980-2004). Informe temático de la División Recursos Hídricos, Departamento de Hidrología, Dirección Nacional de Aguas, MVOTMA, Uruguay.
- DINAGUA (2012). "Regionalización y correlaciones de parámetros hidrológicos" (1980-2004). Informe temático de la División Recursos Hídricos, Departamento de Hidrología, Dirección Nacional de Aguas, MVOTMA, Uruguay.
- Failache N., Charbonnier F., Genta J.L., Chreties Ch. (2006). “Calibración y regionalización de un modelo de balance hídrico mensual en cuencas uruguayas utilizando un algoritmo genético multiobjetivo”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Genta J.L., Charbonnier F., Failache N. (2001). “Modelo regional de balance hídrico mensual para cuencas no aforadas en Uruguay”. IV Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Genta J.L. y Failache N. (2010). “Monitoreo y disponibilidad de recursos hídricos en Uruguay”. Dirección Nacional de Aguas y Saneamiento (DINASA – MVOTMA).
- IMFIA-DNH-PHI-UNESCO (2002). “Balances hídricos superficiales en cuencas del Uruguay”.
- 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

Bibliografía

- 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
- Molfino J.H., Califra A. (2001). “Agua disponible de las tierras del Uruguay”. División de Suelos y Aguas, MVOTMA, Uruguay.
- Palmer W. (1965). Meteorological Drought. Research Paper No. 45, 1965, 58 p.1-65.
- Temez J.R. (1977). “Modelo matemático de transferencia precipitación aportación”. ASINEL 1977.
- Thomas H.A. (1981). “Improved methods for national water assessment”. Report, Contract: WR15249270. Washington, D.C.: US Water Resource Council.
- Thornthwaite C.W. (1948). “An approach toward a rational classification of climate”. American Geographical Society 38(1): 55-94.
- Thornthwaite C.W. and Mather J.R. (1955). “The water balance”. Publ. Climatol., 8(1).
- Thornthwaite C.W. and Mather J.R. (1957). “Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance”. Publ. Climatol., 10(3).