

INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA



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

MODELACIÓN HIDROLÓGICA



Índice

- **Conceptos básicos**
- **Clasificación de modelos hidrológicos**
 - ❖ Descripción de los procesos
 - ❖ Escala espacial y temporal
- **Calibración y validación/verificación**
 - ❖ Función objetivo
 - ❖ Indicadores de desempeño
 - ❖ Análisis de sensibilidad
- **Aspectos prácticos en el uso de modelos hidrológicos**
- **Ejemplos de modelos hidrológicos y aplicaciones**
 - ❖ GR4J (HBV, SWAT, ...)

CONCEPTOS BÁSICOS

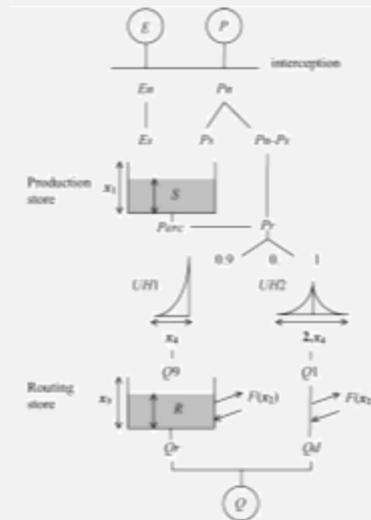
CUENCA HIDROGRÁFICA

- ❖ Sistema biofísico
- ❖ Real
- ❖ Complejo



MODELO HIDROLÓGICO

- ❖ Representación
- ❖ Simplificación
- ❖ Entradas / Salidas

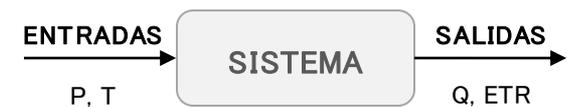


Lograr la “mejor aproximación posible” entre las variables simuladas y observadas y así luego aplicar el modelo para alcanzar el objetivo planteado.

CONCEPTOS BÁSICOS

Cuenca hidrográfica

- ❖ **Sistema** que, accionado por ciertas entradas o estímulos como la precipitación, a través de los diversos procesos del **ciclo hidrológico**, transforma esta precipitación en escorrentía.
- ❖ La **estructura del sistema hidrológico** depende de características tales como el suelo, la cobertura vegetal, la topografía, etc.
- ❖ Los **procesos hidrológicos** que regulan el comportamiento del sistema son la infiltración, el escurrimiento superficial, la percolación, etc.



Definición: Un **sistema** es un **conjunto de partes** conectadas entre sí, que forman un todo y que, frente a ciertas **entradas**, le responde mediante determinadas **salidas**.

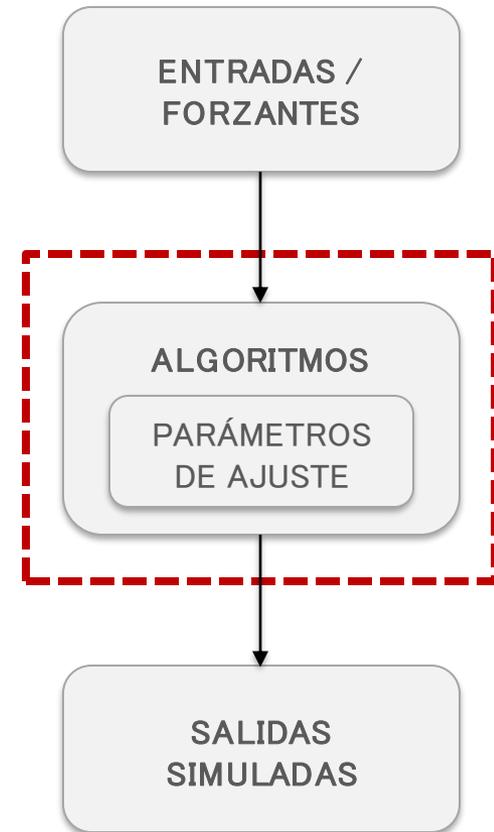
CONCEPTOS BÁSICOS

Modelo

- ❖ **Representación** del comportamiento del sistema.
- ❖ Busca **simplificar** la complejidad del mundo real exagerando selectivamente los aspectos fundamentales de un sistema.
- ❖ **Estructura del modelo:**

Consiste en un **conjunto de algoritmos** (módulos) que describen los procesos claves que regulan el fenómeno que se busca simular.

Estos algoritmos requieren de ciertos **parámetros**.



Un modelo debe ser lo **suficientemente simple** para que se lo comprenda y utilice, y lo **suficientemente complejo** para representar el sistema bajo estudio.

CONCEPTOS BÁSICOS

Modelo

¿Qué es un modelo?

- ❖ *“Es una simplificación de la realidad en cierto período de tiempo o dominio espacial, destinada a la comprensión del sistema real”.*

(Bellinger, 2004)

- ❖ *“Es una simplificación de la realidad que retiene los suficientes aspectos del sistema original como para hacerlo útil para el modelador”.*

(Chapra y Canale, 2006)

Preguntas clave:

- ❖ ¿Qué queremos modelar?
- ❖ ¿Para qué necesitamos modelarlo?

CONCEPTOS BÁSICOS

Modelo

Preguntas clave:

- ❖ ¿Qué queremos modelar?
- ❖ ¿Para qué necesitamos modelarlo?

Algunos ejemplos:

- ❖ **Escurremientos mensuales** para estimar la disponibilidad de agua media en una cuenca.
- ❖ **Eventos extremos** para control y alerta temprana de inundaciones.
- ❖ **Caudales diarios** para generación hidroeléctrica.



CONCEPTOS BÁSICOS

Aplicaciones de los modelos hidrológicos

- ❖ Generación de series de caudal en cuencas no aforadas.
- ❖ Extensión/relleno de series de caudal en cuencas aforadas.

Estudio del sistema

- ❖ Caracterización del comportamiento del sistema.
- ❖ Análisis y compresión de los procesos hidrológicos.
- ❖ Análisis de consistencia: relación niveles–precipitación, curvas de aforo.

Diseño

- ❖ Diseño de obras hidráulicas: riego, generación de energía (hidroeléctrica, hidrocínética), abastecimiento de agua potable, etc.



CONCEPTOS BÁSICOS

Aplicaciones de los modelos hidrológicos

Gestión

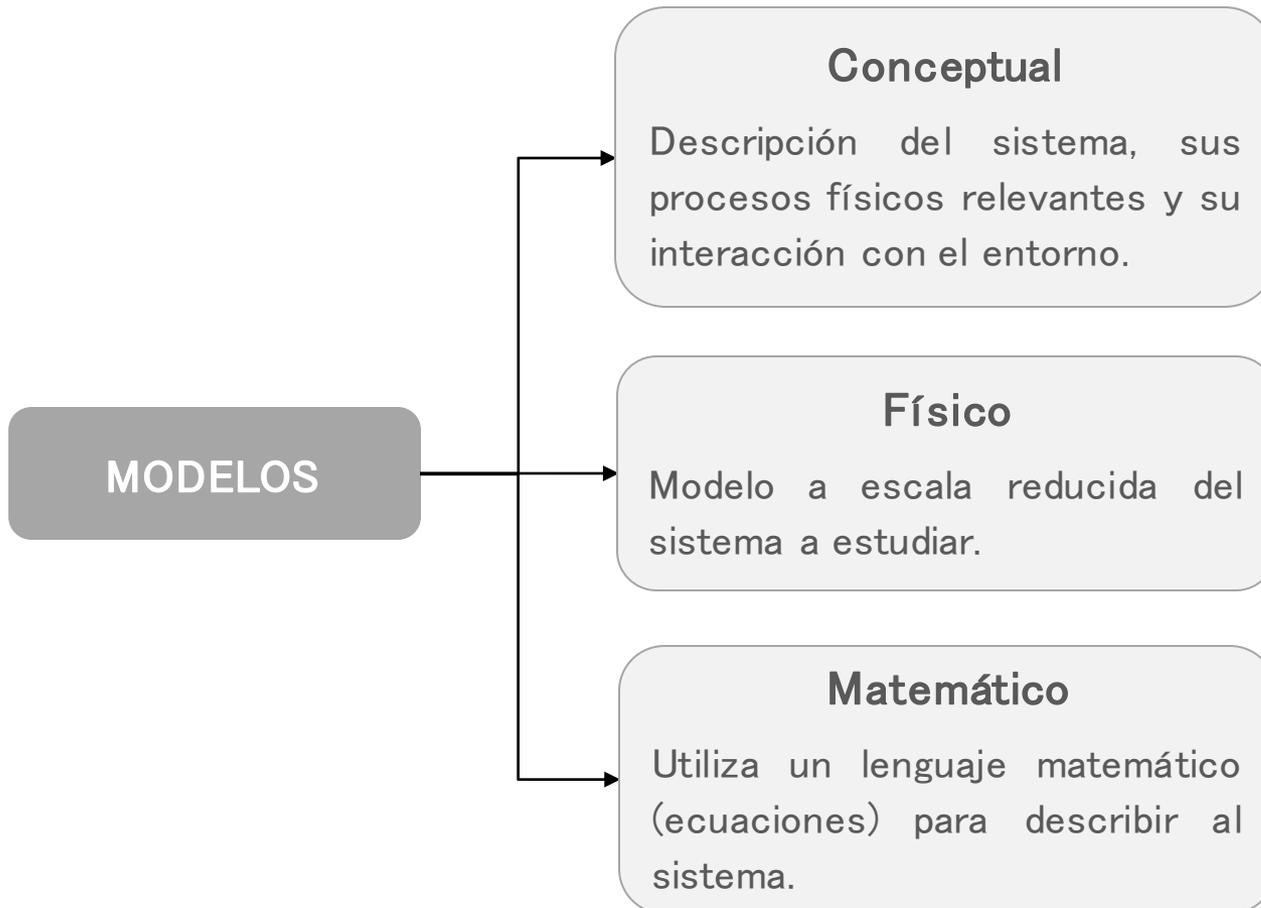
- ❖ Diseño y evaluación de escenarios para la gestión de los recursos hídricos y ordenamiento territorial.
- ❖ Cuantificación del impacto sobre la disponibilidad del recurso generado por cambios de uso del suelo y/o escenarios de cambio climático.
- ❖ Evaluación de impactos ambientales.
- ❖ Previsión de niveles y/o caudales en tiempo real:
 - Control y alerta temprana de inundaciones
 - Operación de obras hidráulicas
 - Navegación
- ❖ Para asociar a modelos de calidad de aguas y gestión de recursos hídricos.



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Existen numerosas clasificaciones,
ninguna permite establecer categorías
estrictamente excluyentes.
¡Puede haber superposición!

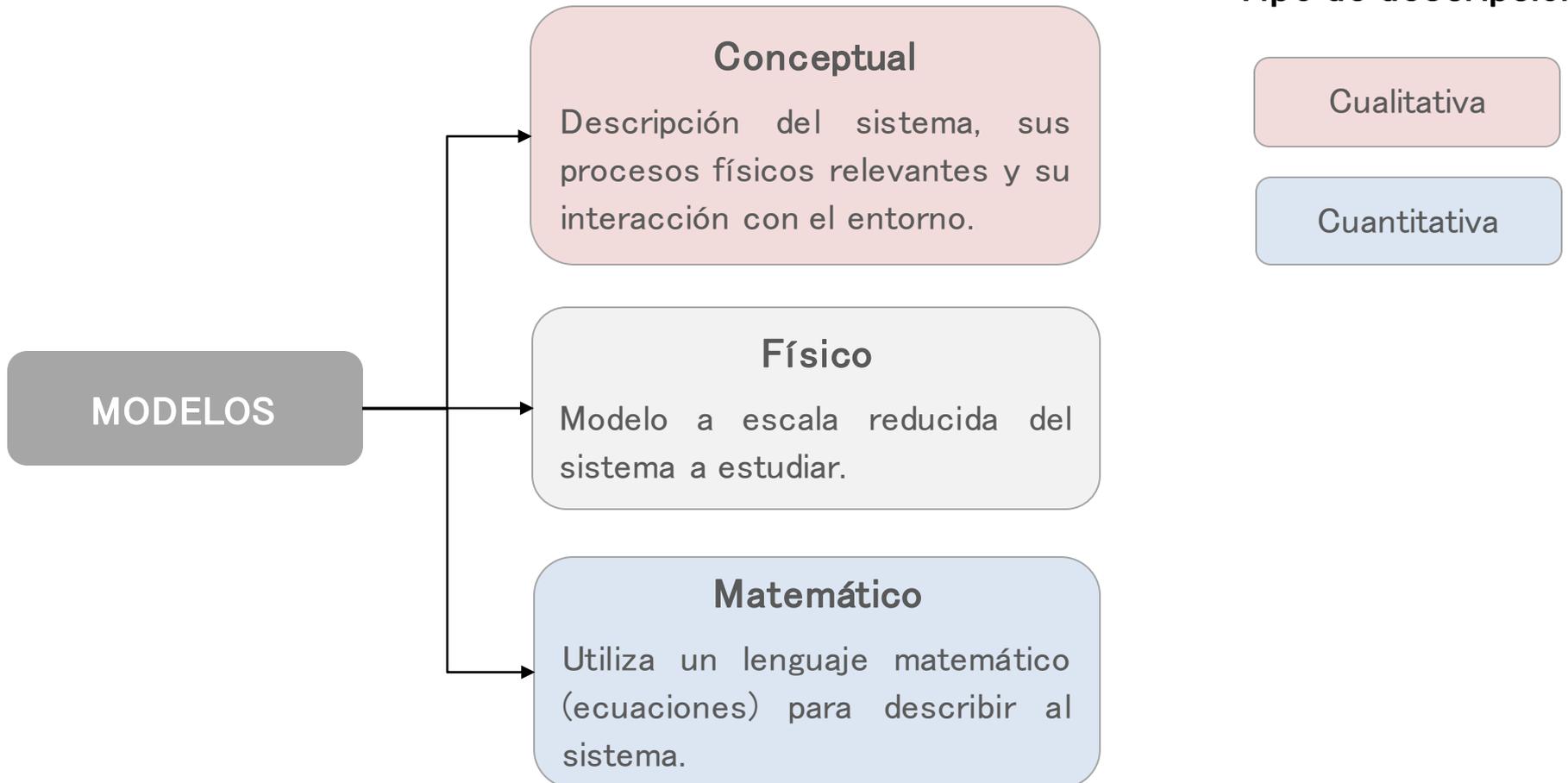
Descripción de los procesos



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

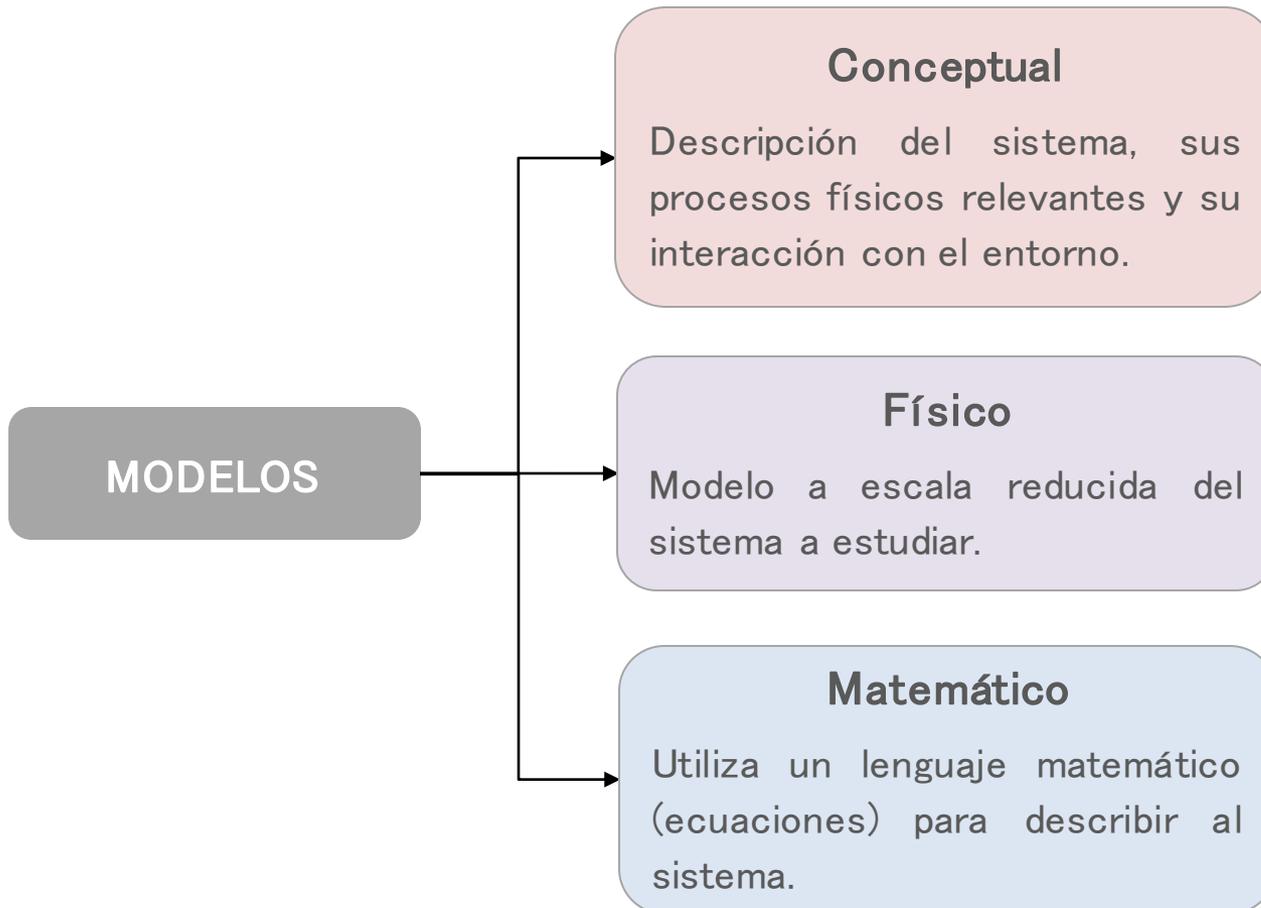
Descripción de los procesos

Tipo de descripción

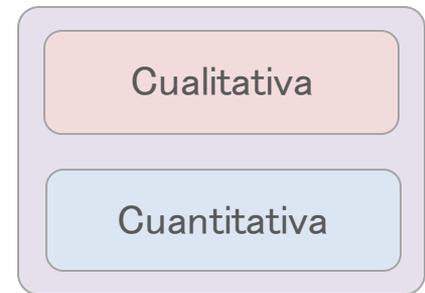


CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Descripción de los procesos



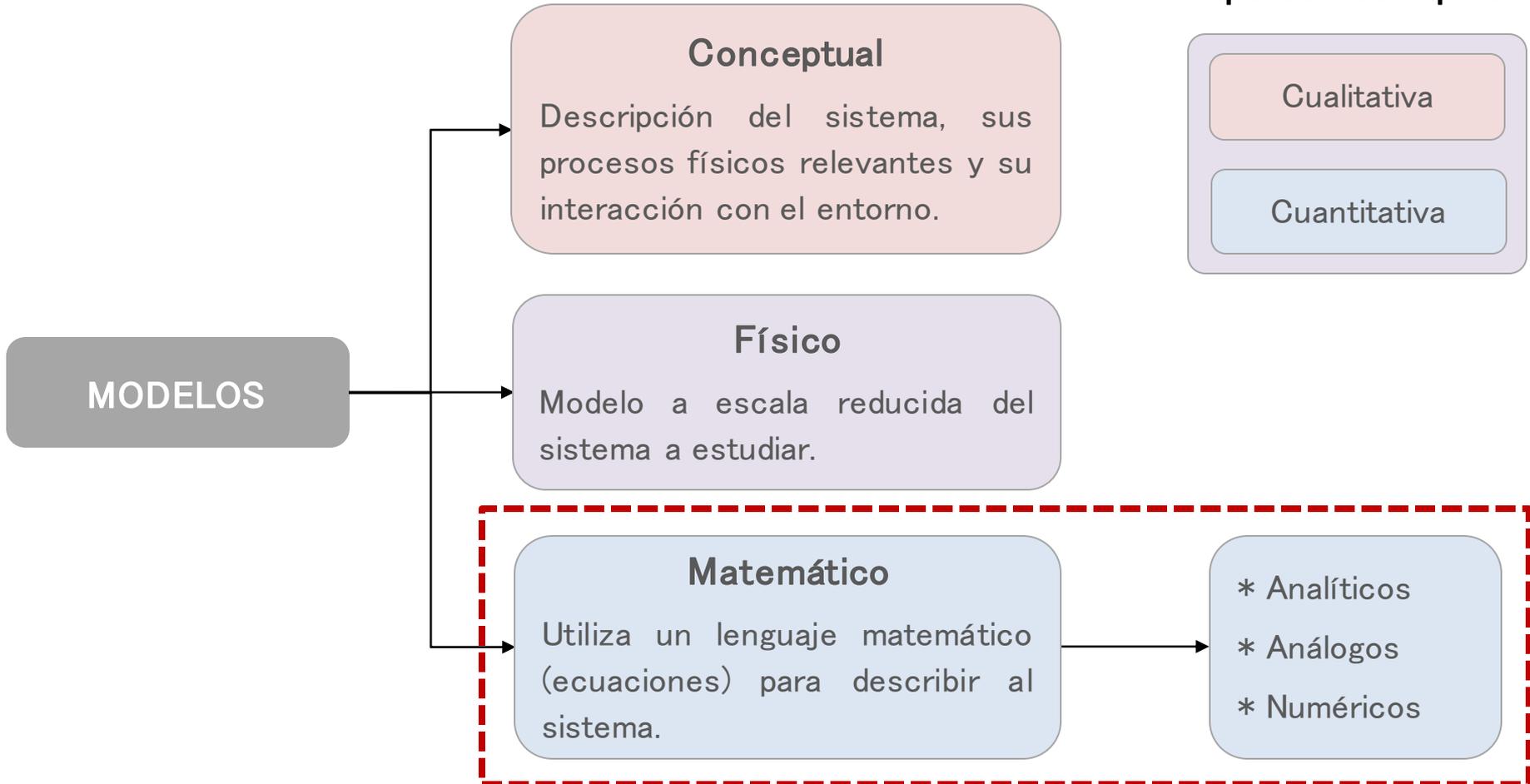
Tipo de descripción



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Descripción de los procesos

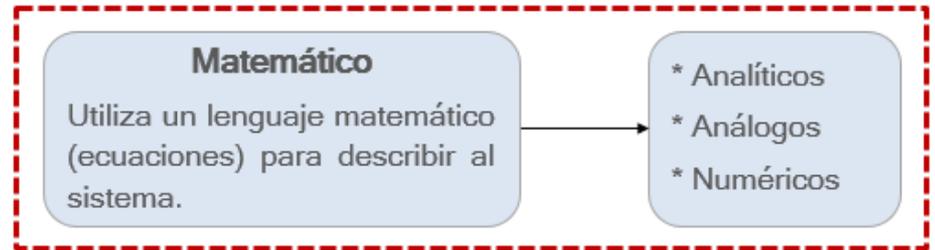
Tipo de descripción



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Descripción de los procesos

Modelos matemáticos



❖ Analíticos

Dan soluciones exactas de las ecuaciones que gobiernan el sistema considerando determinadas condiciones de borde.

❖ Análogos

Se valen de la analogía de las ecuaciones que rigen diferentes fenómenos. El sistema real es gobernado por las mismas ecuaciones que otro fenómeno bajo ciertas condiciones.

❖ Numéricos

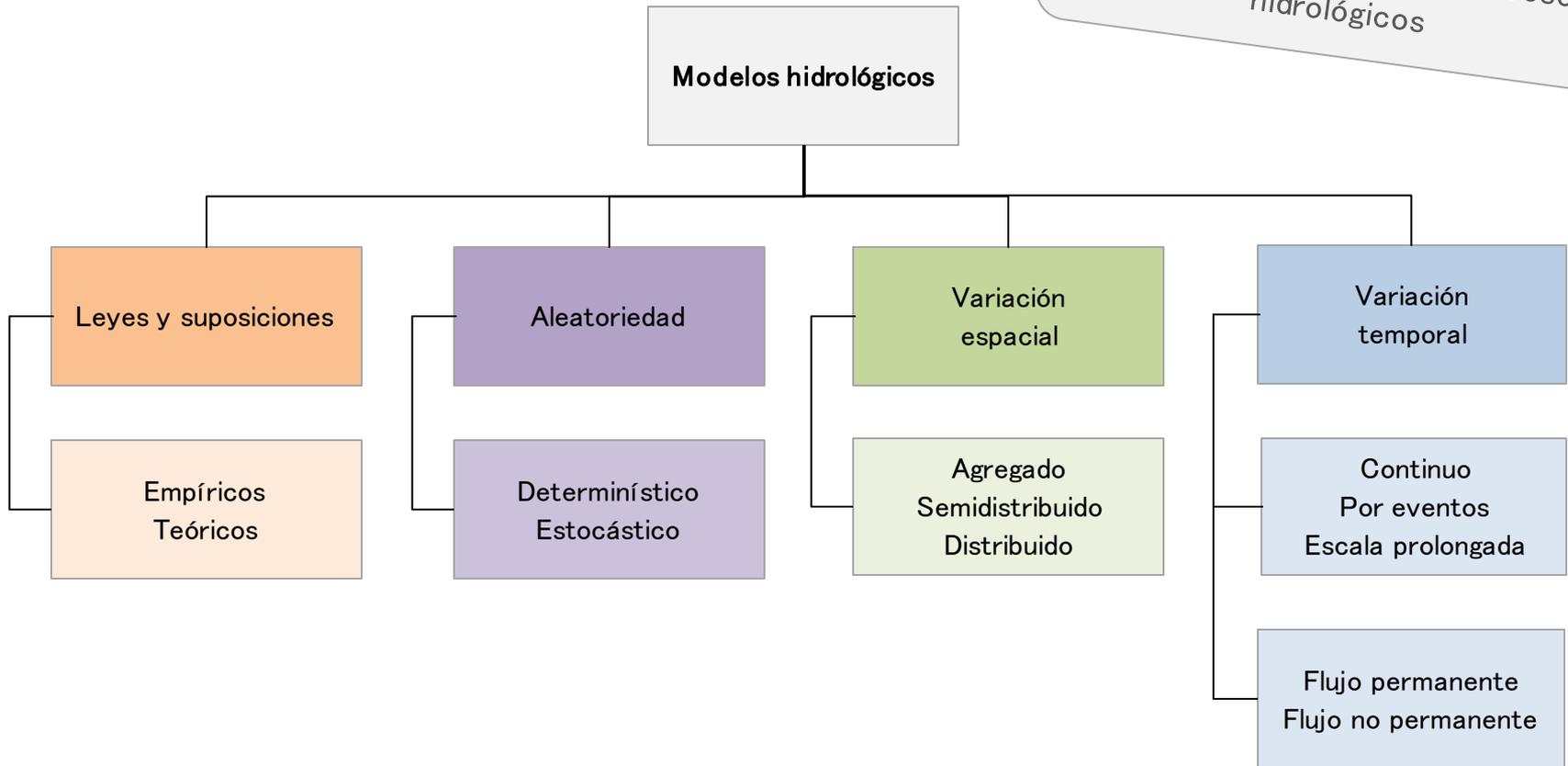
Las ecuaciones diferenciales son discretizadas y su solución se busca en forma aproximada en base a métodos numéricos (diferencias finitas, elementos finitos, etc.), resolviendo un sistema de ecuaciones con la ayuda de recursos informáticos.

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos

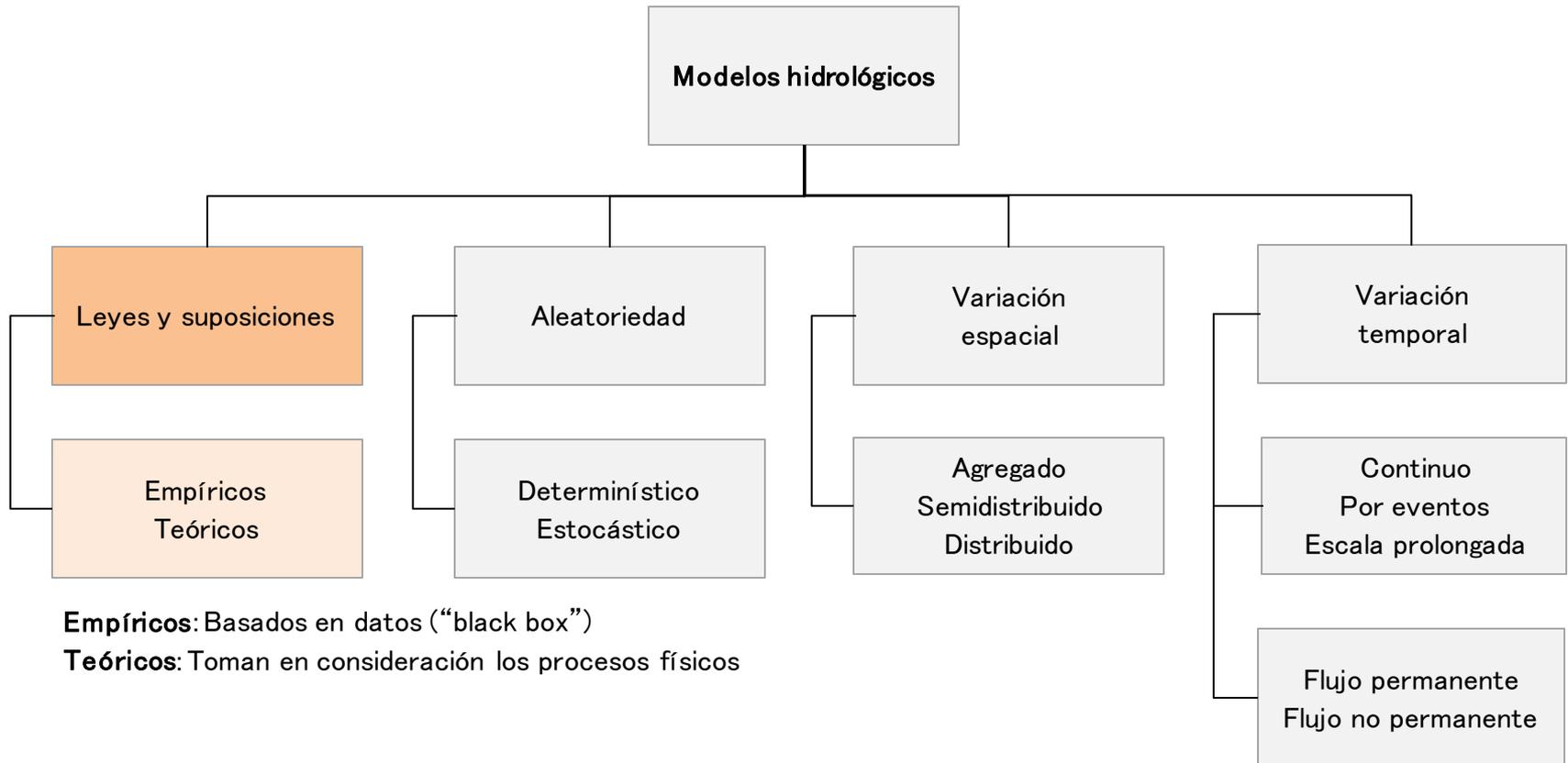
Clasificación de acuerdo a la conceptualización de los procesos hidrológicos



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

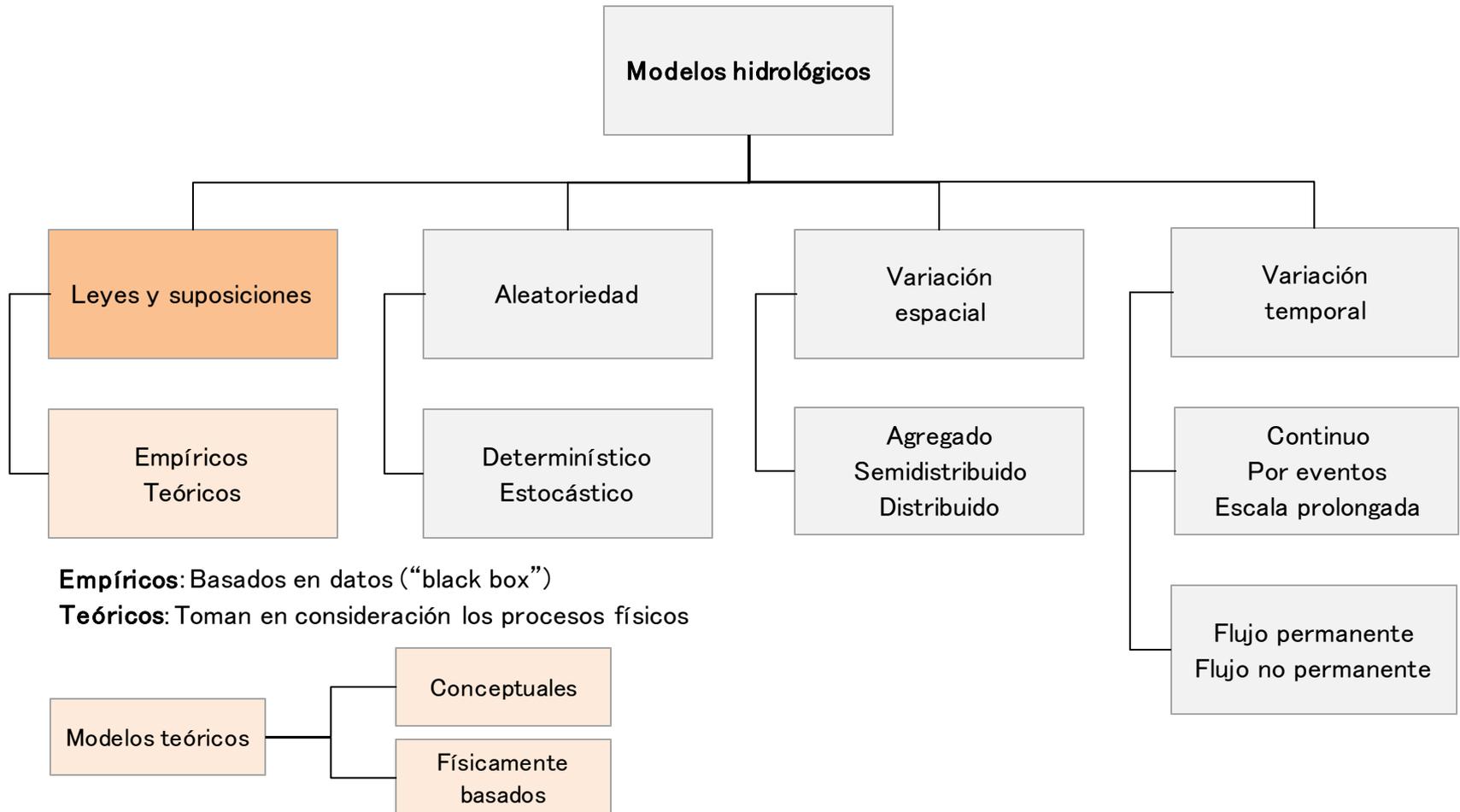
Modelos matemáticos



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Empíricos .vs. Teóricos

Table 1. Characteristics of three models.

| Empirical model | Conceptual model | Physically based model |
|--|---|---|
| Data based or metric or black box model | Parametric or grey box model | Mechanistic or white box model |
| Involve mathematical equations , derive value from available time series | Based on modeling of reservoirs and Include semi empirical equations with a physical basis. | Based on spatial distribution. Evaluation of parameters describing physical characteristics |
| Little consideration of features and processes of system | Parameters are derived from field data and calibration. | Require data about initial state of model and morphology of catchment |
| High predictive power, low explanatory depth | Simple and can be easily implemented in computer code. | Complex model. Require human expertise and computation capability. |
| Cannot be generated to other catchments | Require large hydrological and meteorological data | Suffer from scale related problems |
| ANN, unit hydrograph | HBV model, TOPMODEL | SHE or MIKESHE model |
| Valid within the boundary of given domain | Calibration involves curve fitting make difficult physical interpretation | Valid for wide range of situations. |



Mayor “detalle”, complejidad, información requerida, costo computacional ...

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Empíricos .vs. Teóricos

Ejemplo en la cuenca del río Santa Lucía Chico

- ❖ **Objetivo:** Realizar una comparación de modelos basados en procesos físicos y modelos basados en datos para simular el proceso precipitación–escorrentía con paso diario.



Modelos basados en procesos

- Ecuaciones matemáticas para describir los procesos que componen la etapa terrestre del ciclo hidrológico.
- Se calibran ajustando parámetros de las ecuaciones del modelo matemático.



Arnold et al. (1998)

Modelos basados en datos

- Relacionan los datos de entrada y salida del problema, sin realizar suposiciones sobre los procesos físicos involucrados.
- Se utiliza un algoritmo, que “aprende” sobre el comportamiento de los datos.



Breiman (2001)

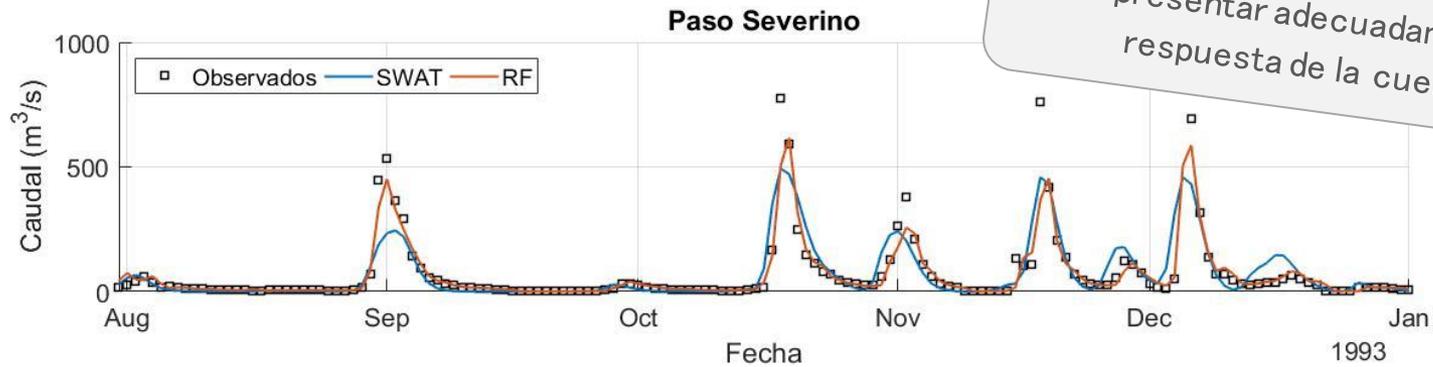
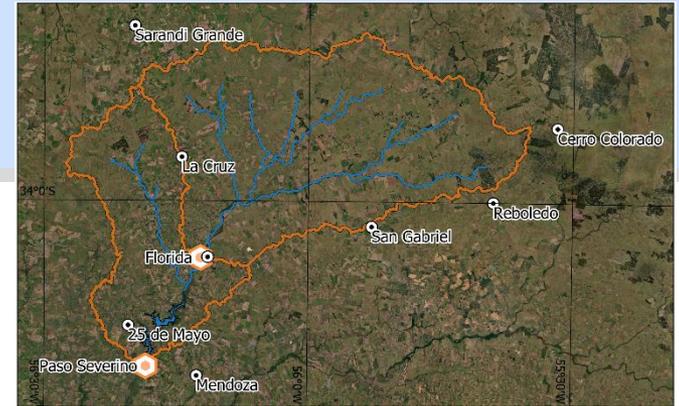
Pedregosa et al. (2011)

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

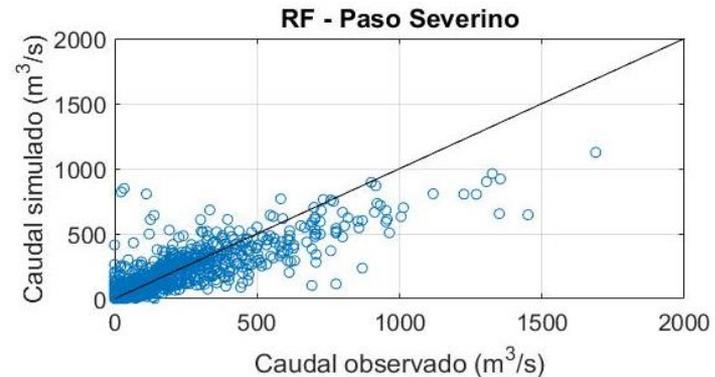
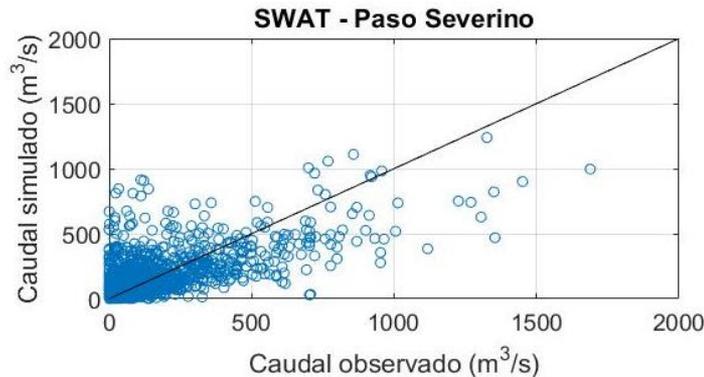
Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Empíricos .vs. Teóricos

Ejemplo en la cuenca del río Santa Lucía Chico



Ambos modelos son capaces de representar adecuadamente la respuesta de la cuenca.

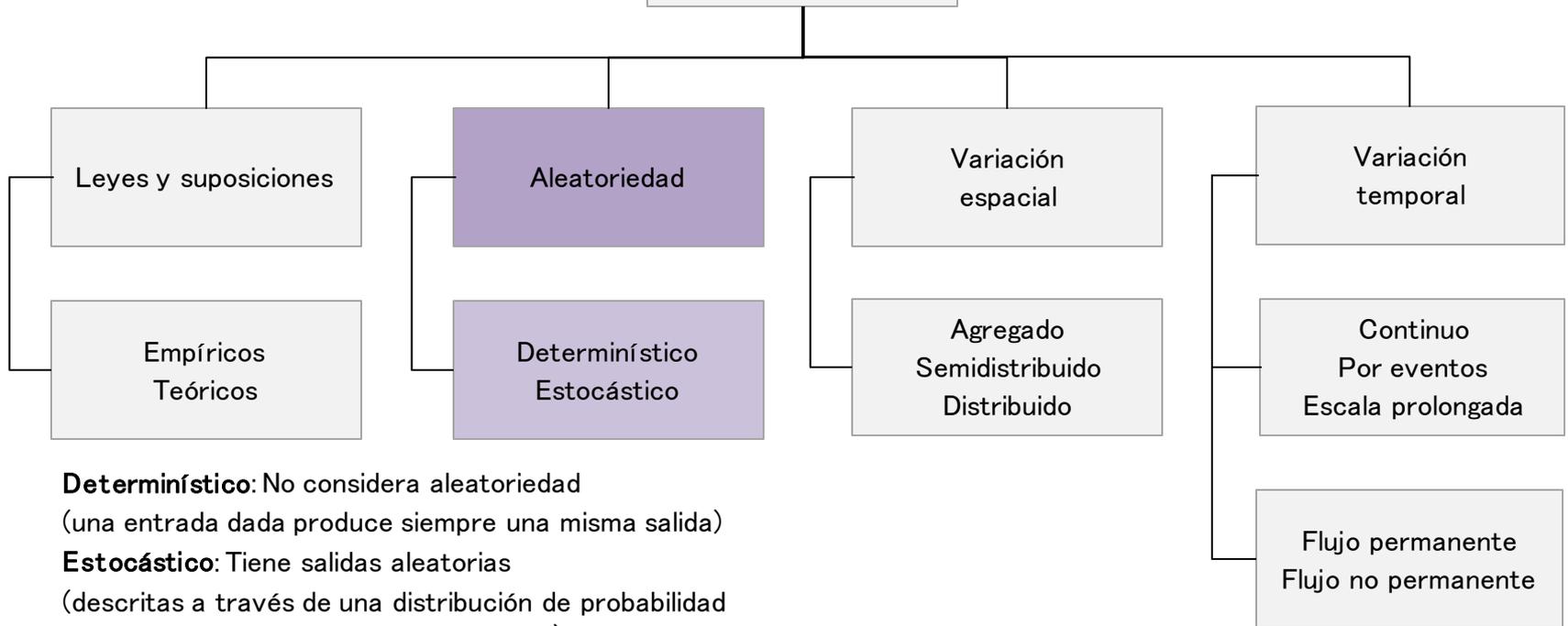


CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos

Modelos hidrológicos



La decisión depende del “grado de aleatoriedad” de los procesos hidrológicos que me interesan.
Ejemplo: ETP versus Precipitación.

Determinístico: No considera aleatoriedad
(una entrada dada produce siempre una misma salida)
Estocástico: Tiene salidas aleatorias
(descritas a través de una distribución de probabilidad asociada al conjunto de valores posibles)

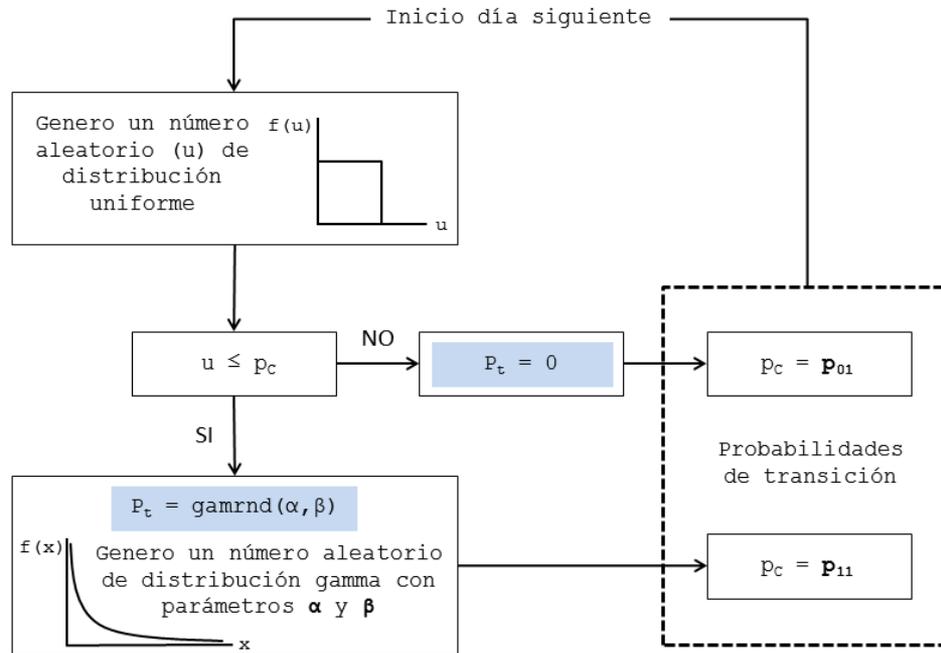
CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos

Ejemplo de modelo estocástico para la precipitación diaria

Modelo Markov+Gamma “Weather generator”

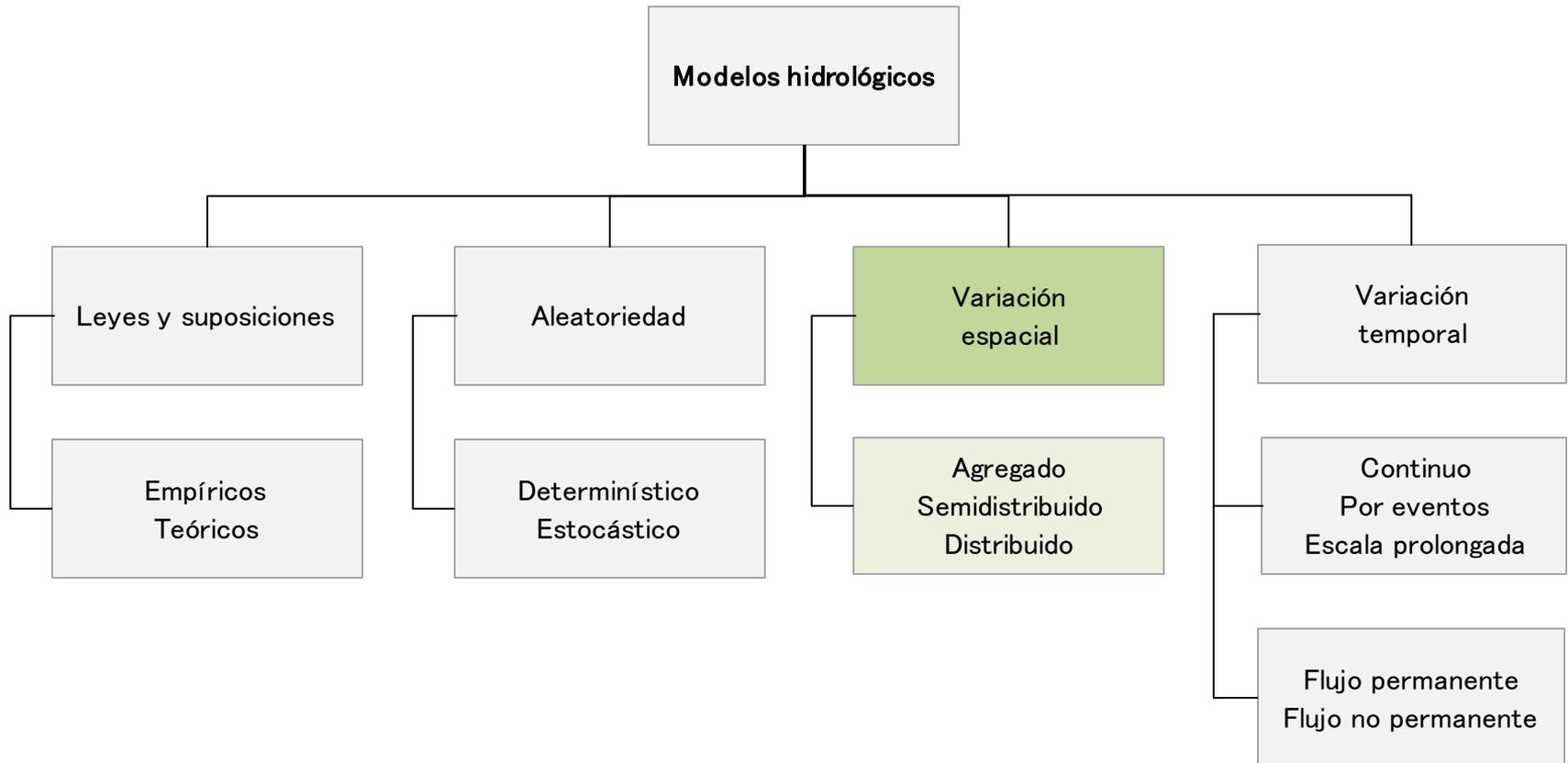


(*) De Vera A. (2014). “Desarrollo de un generador estocástico de precipitación diaria y su aplicación en Uruguay”. Tesis de maestría. UdelaR, FING.

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

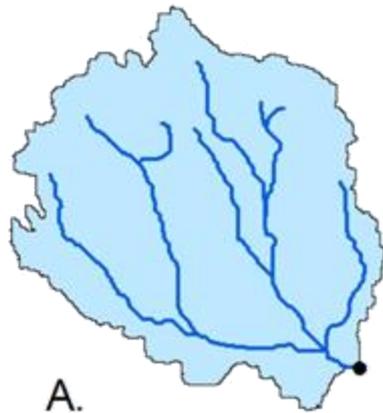
Modelos matemáticos



CLASIFICACIÓN DE MODELOS

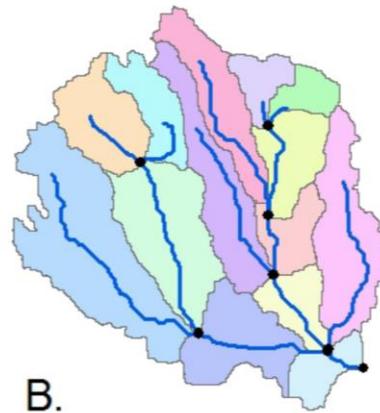
Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Variabilidad espacial



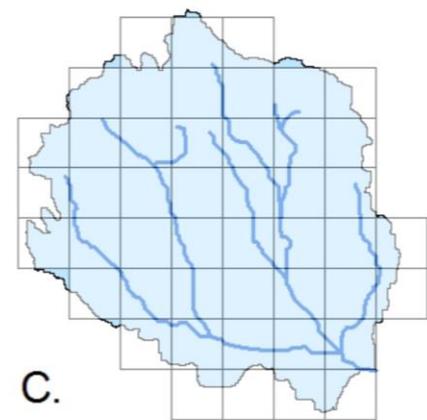
A.

Agregado



B.

Semidistribuido



C.

Distribuido

- ❖ ¿Cuándo es importante incluir la variabilidad espacial?
 - Extensión superficial de la cuenca.
 - Heterogeneidad física de la cuenca (tipo y usos del suelo, topografía, ...) y de los procesos hidrológicos (infiltración, interceptación, ...).
 - Interesa particularmente estudiar los procesos espaciales en la cuenca.
- ❖ ¿Disponibilidad de datos y detalle en el “modelo espacial”?

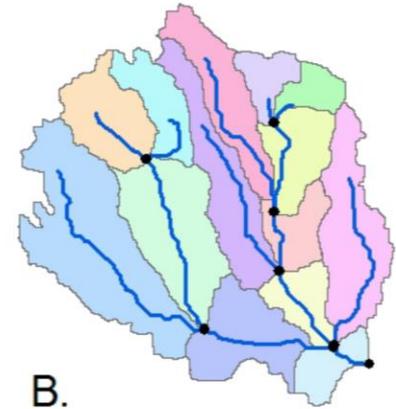
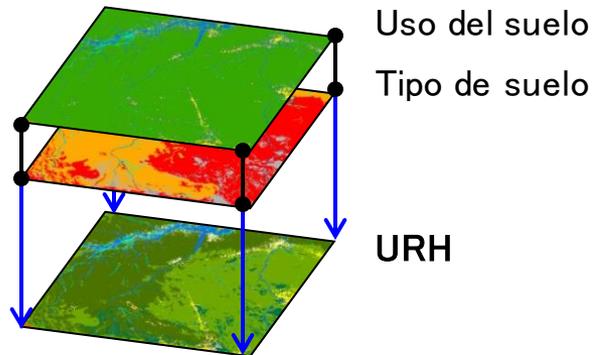
CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Variabilidad espacial

Modelo semidistribuido

- ❖ División de la cuenca y cálculo del escurrimiento en:
 - **Subcuencas**
 - **URH:** Unidades de respuesta hidrológica
- ❖ Tránsito hidrológico.



B.

Semidistribuido

- ❖ Cada URH es el resultado de la combinación de la pendiente, el uso y tipo de suelo, etc.
- ❖ Cada subcuenca tiene una determinada composición de URHs.

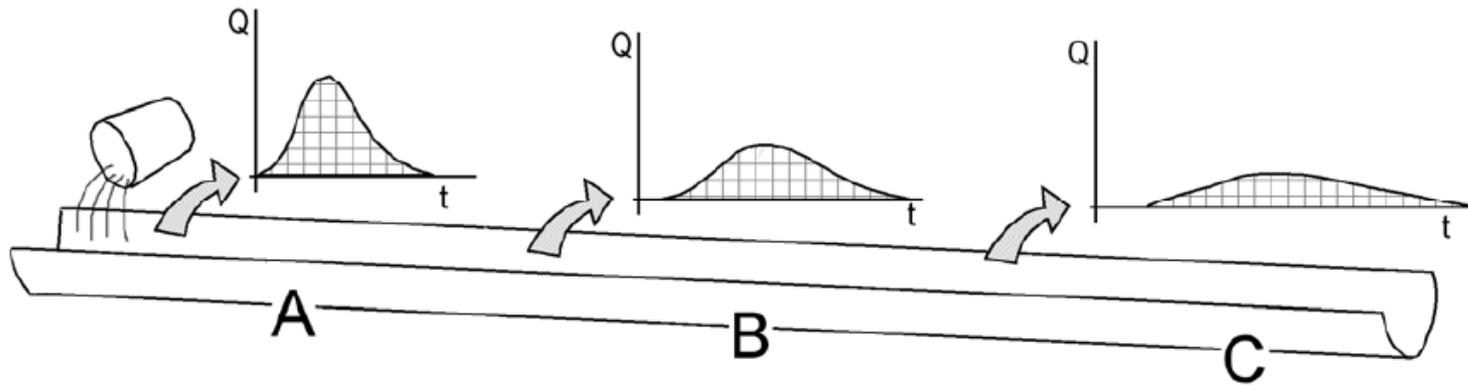
CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Variabilidad espacial

Tránsito de caudales

- ❖ Procedimiento para determinar el hidrograma en un punto del curso de agua a partir del hidrograma (conocido) en uno o más puntos aguas arriba.
- ❖ Tránsito hidrológico / Tránsito hidráulico



Efecto del tránsito a lo largo de un canal o río (sin aportes laterales)

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Variabilidad espacial

Table 2. Comparison of the spatial structures in rainfall-runoff models

| | Lumped | Semi-Distributed | Distributed |
|------------|---|--|--|
| Method | Spatial variability is disregarded; entire catchment is modeled as one unit | Series of lumped and distributed parameters | Spatial variability is accounted for |
| Inputs | All averaged data by catchment | Both averaged and specific data by sub-catchment | All specific data by cell |
| Strengths | Fast computational time, good at simulating average conditions | Represents important features in catchment | Physically related to hydrological processes |
| Weaknesses | A lot of assumptions, loss of spatial resolution, not ideal for large areas | Averages data into sub-catchment areas, loss of spatial resolution | Data intense, long computational time |
| Examples | Empirical and conceptual models, machine learning | Conceptual and some physical models, TOPMODEL ^[a] , SWAT ^[b] | Physically distributed models, MIKESHE ^[c] , VELMA ^[d] |



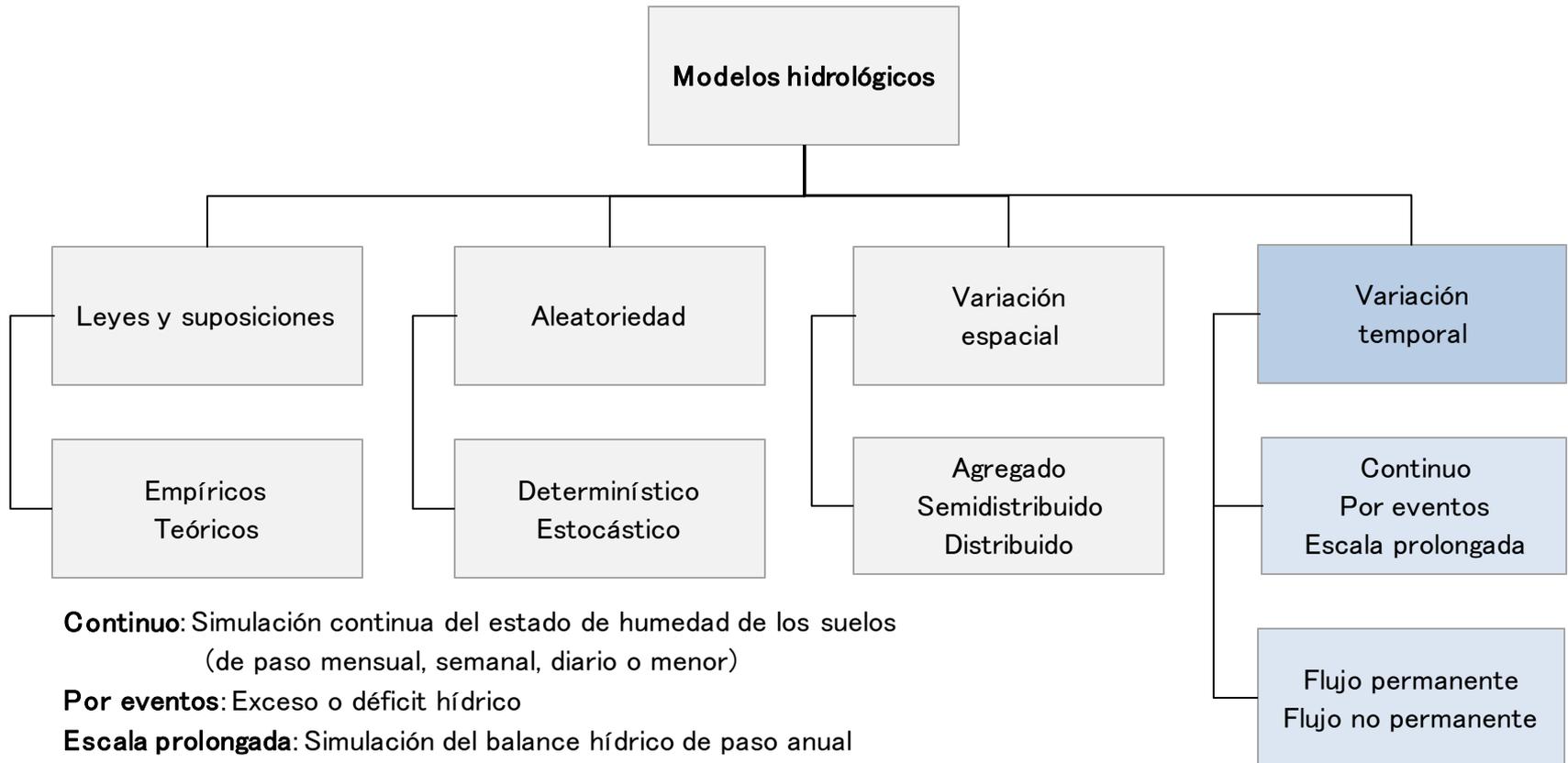
Mayor “detalle”, complejidad, información requerida, costo computacional ...

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

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos

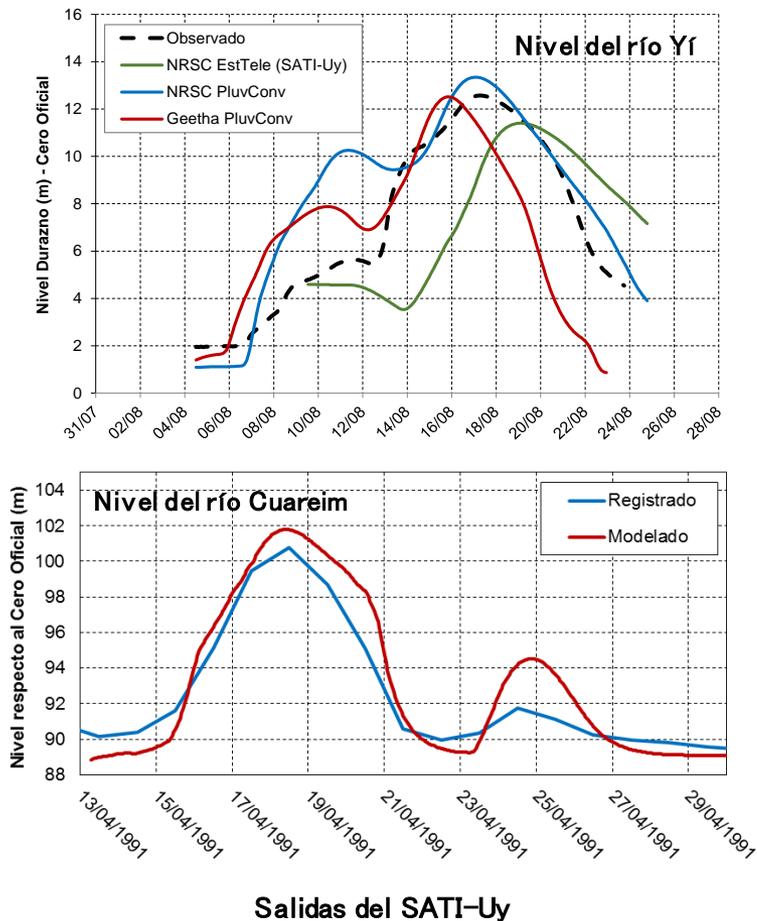


CLASIFICACIÓN DE MODELOS

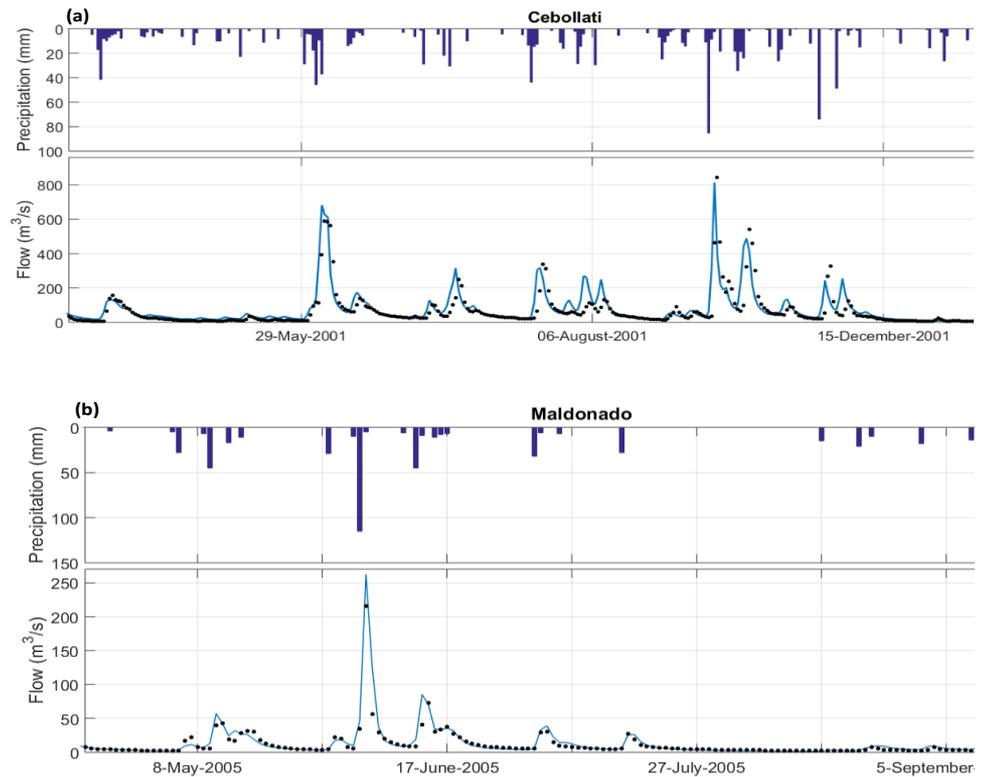
Modelos hidrológicos

Modelos matemáticos: Variabilidad temporal

Simulación por eventos



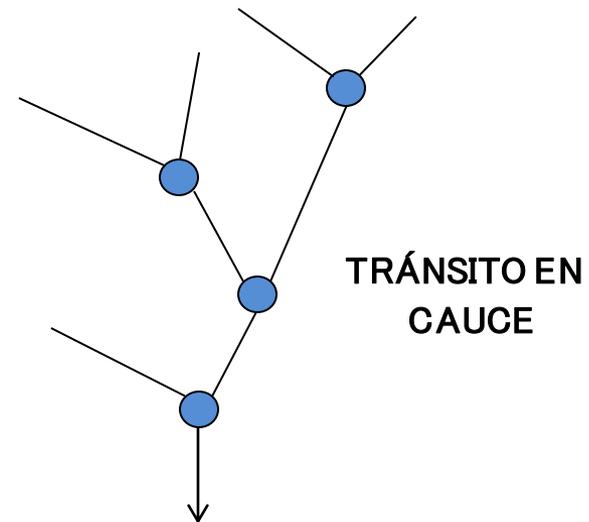
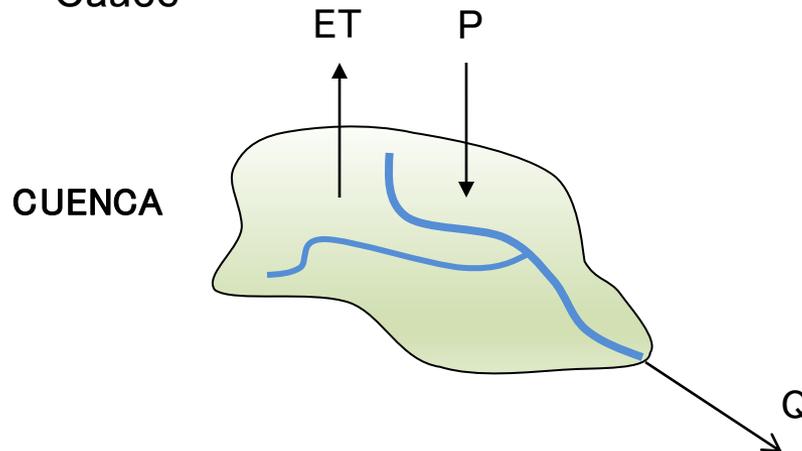
Simulación continua



MODELOS HIDROLÓGICOS

Características

- ❖ Variables de entrada
 - Precipitación
 - Temperatura
 - Evapotranspiración potencial
- ❖ Estructura básica de integración de los procesos
 - Cuenca
 - Cauce



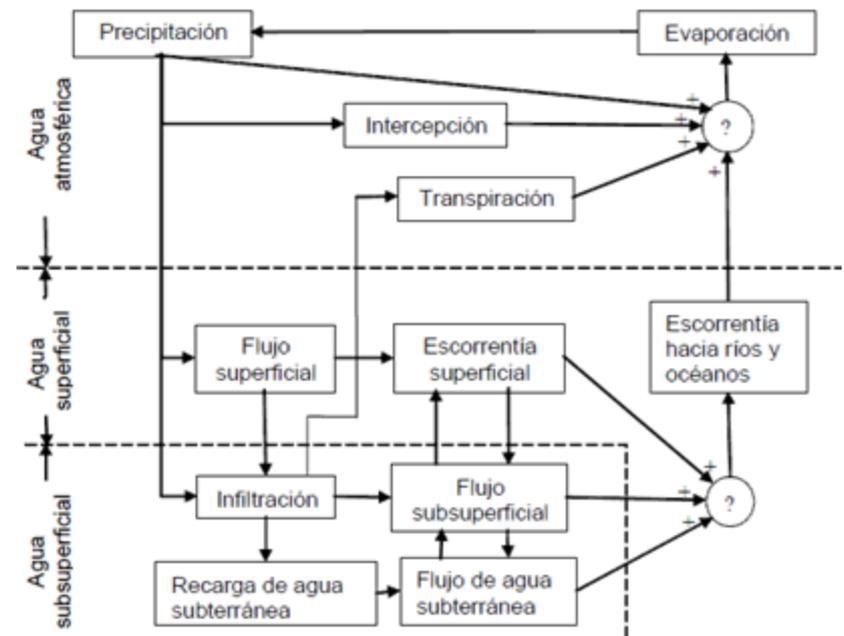
MODELOS HIDROLÓGICOS

Estructura

Modelos matemáticos, conceptuales

Representan el ciclo hidrológico:

- ❖ Precipitación
- ❖ Intercepción
- ❖ Evapotranspiración
- ❖ Infiltración
- ❖ Flujo superficial
- ❖ Flujo subsuperficial
- ❖ Percolación
- ❖ Flujo subterráneo
- ❖ Flujo en el cauce



Cada modelo está compuesto por un conjunto de algoritmos.

MODELOS HIDROLÓGICOS

Estructura

Modelos matemáticos, conceptuales

Fenicia et al. (2011) afirman que sólo hay **6 (4) elementos** en todas las estructuras hidrológicas.

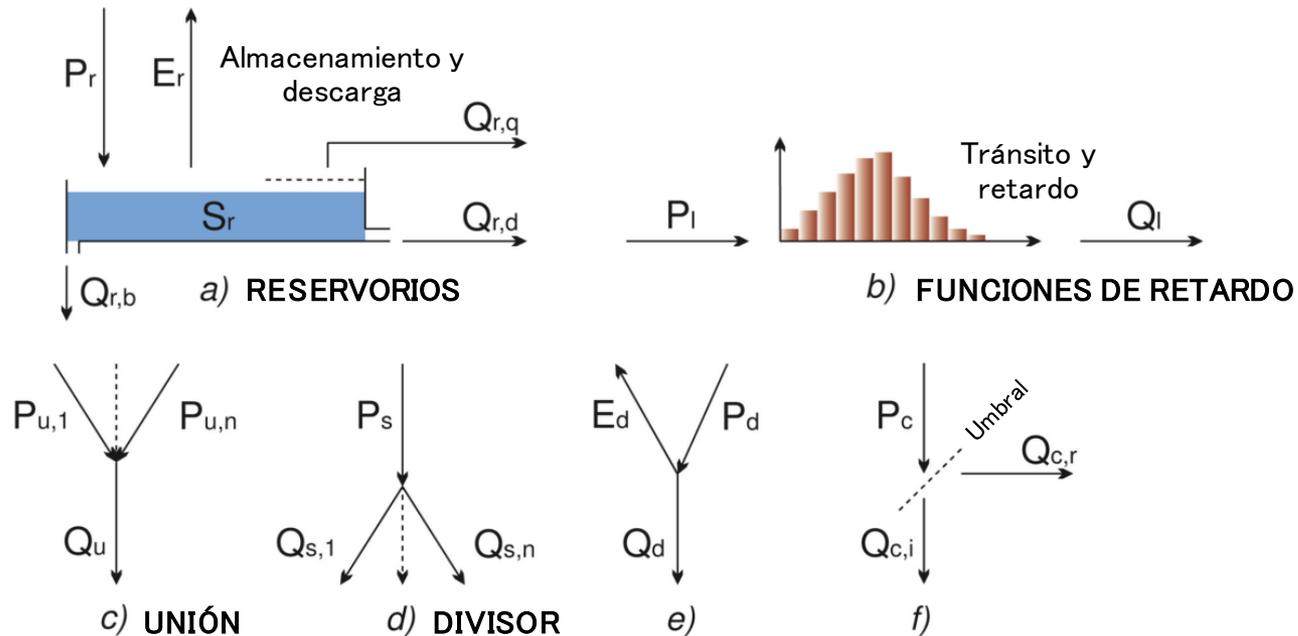
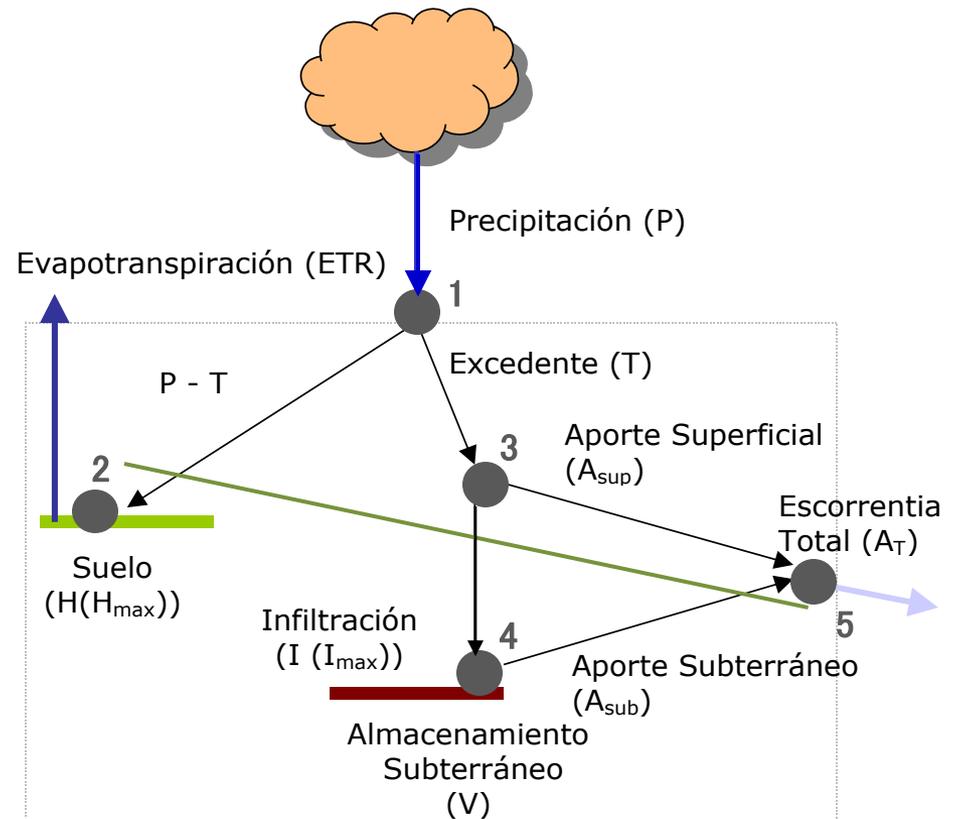
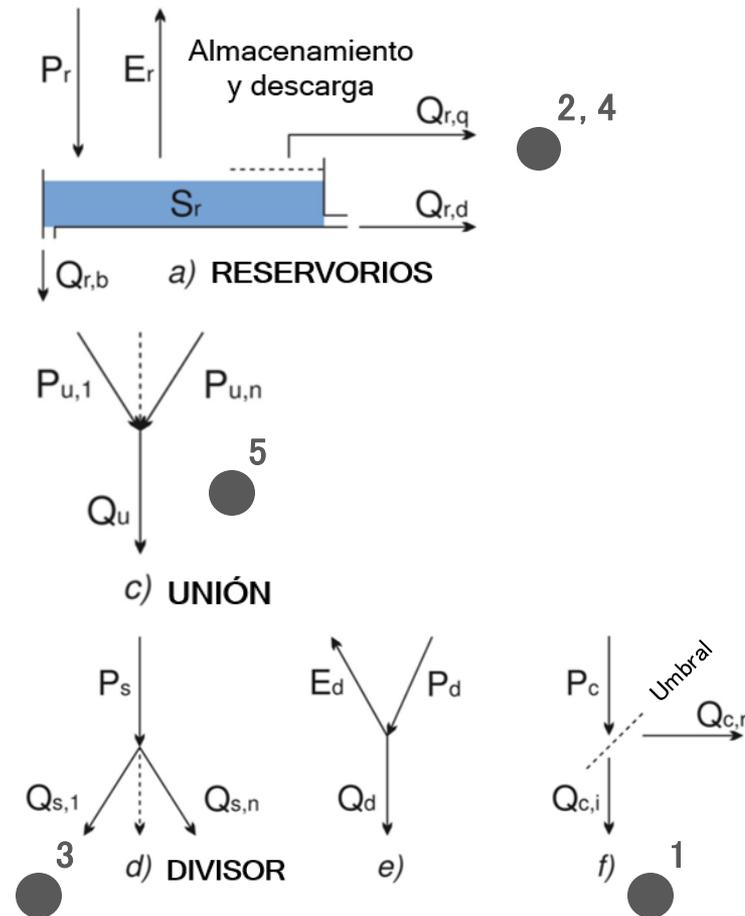


Figure 1. Generic building blocks of the flexible framework: (a) generic reservoir and (b) lag function. Connection elements: (c) union and (d) splitter. Splitters can be used to represent (e) the subtraction of evaporation from rainfall and (f) the threshold-type occurrence of Hortonian flow.

MODELOS HIDROLÓGICOS

Estructura

Ejemplo: Modelo de Temez

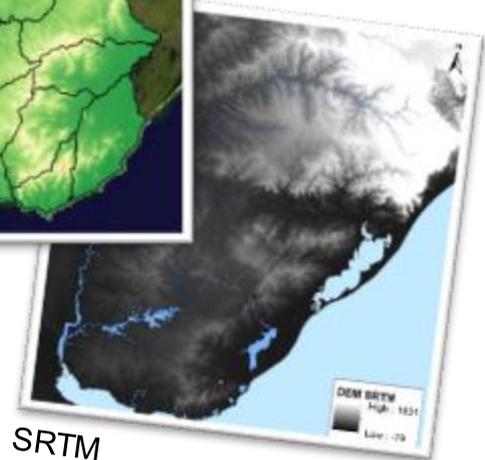
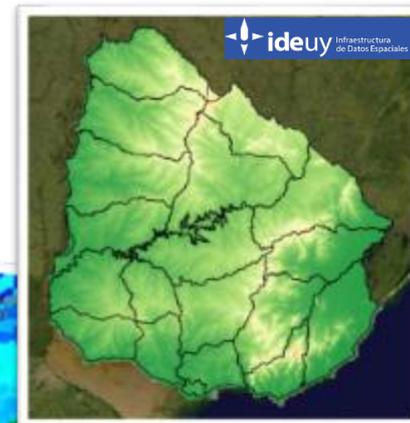
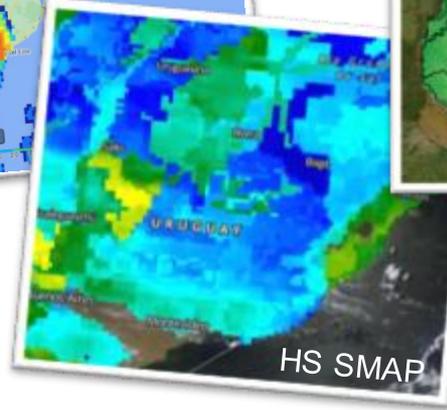
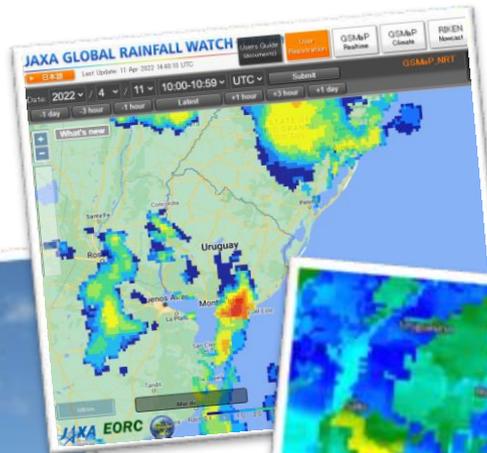
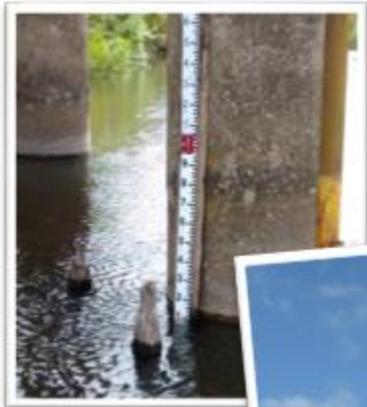
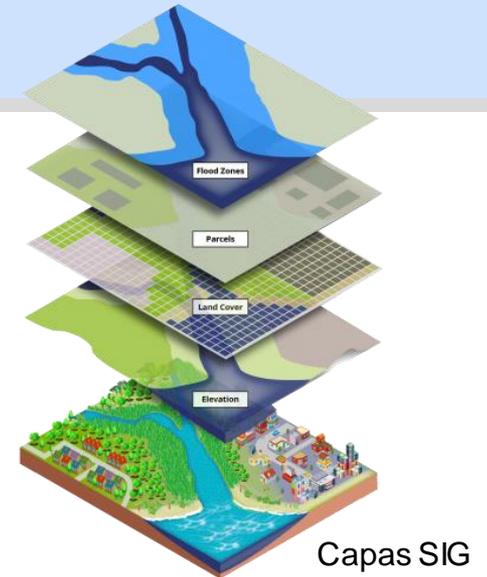


Las ecuaciones del modelo resultan de aplicar un balance hídrico a cinco volúmenes de control.

MODELOS HIDROLÓGICOS

Adquisición/Procesamiento de datos

- ❖ Mediciones de campo
- ❖ Sensoramiento remoto
- ❖ Modelos digitales del Terreno (MDT)
- ❖ Sistemas de Información Geográfica (SIG)

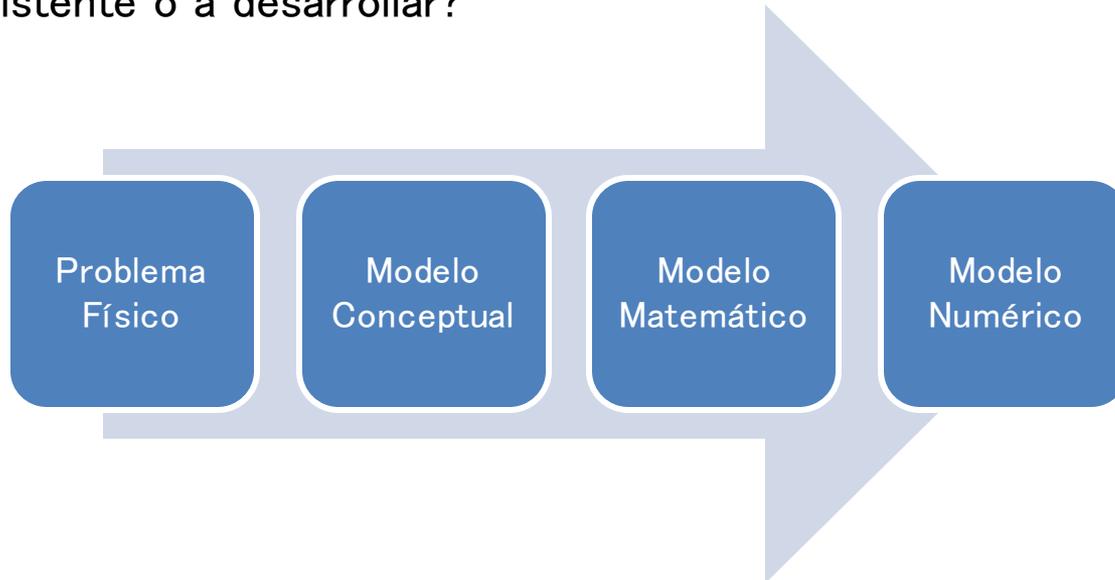


PROCESO DE MODELACIÓN

Preguntas a responder

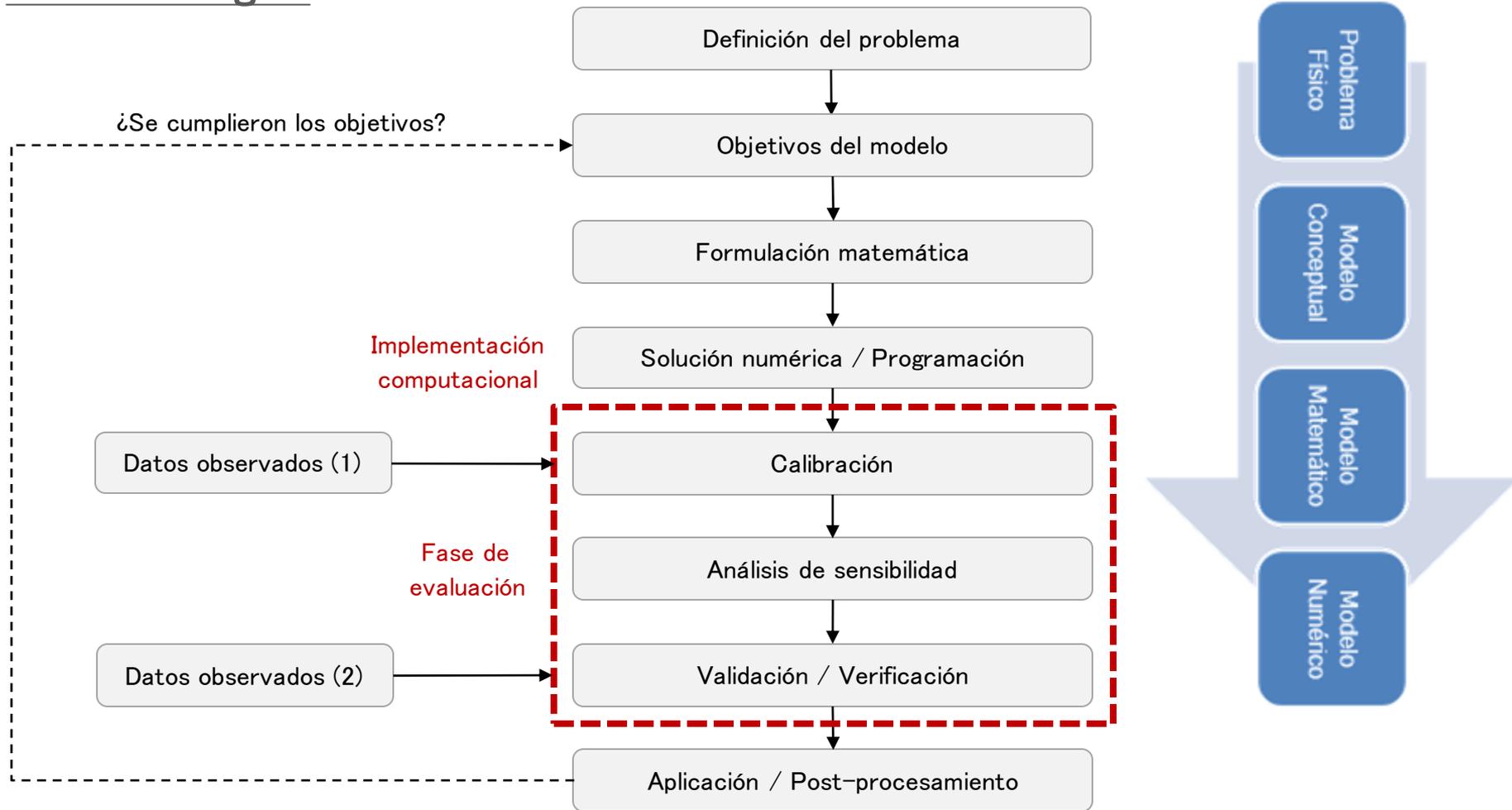
- ❖ ¿Qué fenómeno quiero estudiar?
- ❖ ¿Qué modelo utilizo?
- ❖ ¿En qué hipótesis se basa el modelo?
- ❖ ¿Cuál se ajusta a mis necesidades y recursos disponibles?
- ❖ ¿Modelo existente o a desarrollar?

Principio de Parsimonia:
“Lo más simple posible con los datos disponibles”



PROCESO DE MODELACIÓN

Pasos a seguir



(* Adaptado de Popescu (2014), "Computational Hydraulics".

PROCESO DE MODELACIÓN

Algunas definiciones

❖ **Calibración**

Proceso en que se determinan/ajustan los valores de los parámetros del modelo para el caso de estudio, de manera de lograr la mejor aproximación posible entre las series simuladas y observadas.

❖ **Estudio de sensibilidad**

Proceso por el cual se determina la sensibilidad de los resultados a modificaciones de los parámetros alrededor de los valores calibrados.

PROCESO DE MODELACIÓN

Algunas definiciones

❖ **Validación / Verificación**

El modelo, con los parámetros calibrados, es empleado para verificar la validez del ajuste considerando un conjunto de datos independientes de los utilizados para la calibración.

Debe realizarse principalmente para los rangos de valores de salida en que se utilizará el modelo durante su aplicación.

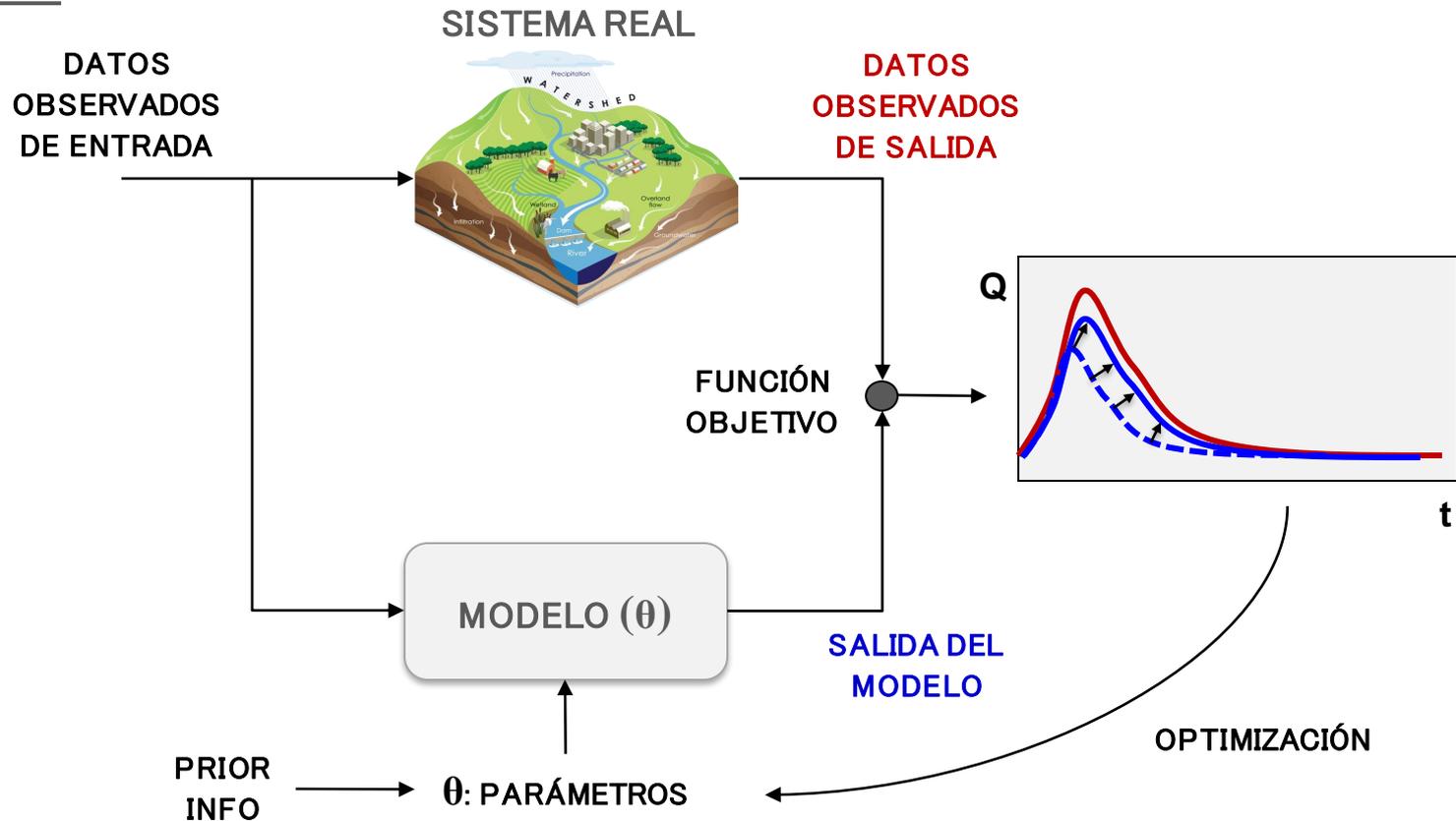
No hay consenso en el uso de estos términos, existen diferentes acepciones.

❖ **Aplicación**

El modelo, una vez calibrado y verificado (validado), es empleado para cuantificar la respuesta del sistema ante diferentes entradas.

CALIBRACIÓN

Concepto



Lograr la “mejor aproximación posible” entre las variables simuladas y observadas y así luego aplicar el modelo para alcanzar el objetivo planteado.

CALIBRACIÓN

Métodos de calibración

Depende de la **disponibilidad de información**:

- ❖ “Calibración” sin datos históricos
- ❖ “Soft-calibration”
- ❖ Ajuste manual iterativo
- ❖ Optimización automática (de la función objetivo)
- ❖ Muestreo en base a mediciones de campo

¡No olvidarse del sentido físico de los parámetros!

¿Tienen alguna relación con las características físicas e hidrológicas de la cuenca?

CALIBRACIÓN

Métodos de calibración

Depende de la **disponibilidad de información**:

❖ “Calibración” sin datos históricos

Cuando no existen datos observados de las variables del sistema, los parámetros pueden estimarse en base a información sobre las características físicas de la cuenca y a rangos de variación posible en base a la literatura.

❖ “Soft-calibration”

Cuando no se tienen, o no se confía, en las observaciones de la variable de interés (en general caudal), se busca representar variables de estado del sistema de las que sí se dispone de información (humedad de suelo, niveles freáticos, etc.).

CALIBRACIÓN

Métodos de calibración

Depende de la **disponibilidad de información**:

- ❖ **Ajuste manual iterativo**

Existiendo datos de las variables de entrada y salida, mediante técnicas iterativas se obtienen los parámetros que mejor representan los datos observados.

- ❖ **Optimización automática**

Existiendo datos de las variables de entrada y salida, mediante el empleo de algoritmos matemáticos se optimiza una función objetivo que representa la diferencia entre las series observadas y simuladas.

- ❖ **Muestreo**

Los valores de los parámetros se obtienen mediante mediciones de campo específicas del sistema.

CALIBRACIÓN

Función objetivo

- ❖ Medida de la bondad del ajuste.
- ❖ Función que representa la diferencia entre los caudales observados y simulados y que se busca optimizar durante el proceso de calibración.
- ❖ La elección de la función objetivo es una componente fundamental en la calibración de los modelos hidrológicos.

Lograr la “mejor aproximación posible” entre las variables simuladas y observadas y así luego aplicar el modelo para alcanzar el objetivo planteado.

CALIBRACIÓN

Función objetivo

Media:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)$$

Varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - \mu)^2$$

- ❖ **Error cuadrático**

$$SE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2$$

SE $\in (0, +\infty)$

- ❖ **Coefficiente de determinación**

$$R^2 = \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sum_{t=1}^N [(Q_{obs}(t) - \mu_{obs})(Q_{sim}(t) - \mu_{sim})]}{\sigma_{obs}\sigma_{sim}} \right\}^2$$

R² $\in (0,1)$

- ❖ **Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - \mu_{obs})^2}$$

NSE $\in (-\infty, 1)$

- ❖ **Diferencia relativa de volúmenes**

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^N Q_{obs}(t) - \sum_{t=1}^N Q_{sim}(t)}{\sum_{t=1}^N Q_{obs}(t)}$$

- ❖ **Diferencia entre los coeficientes de escurrentía**

$$\Delta C = \frac{\sum_{t=1}^N |Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)|}{\sum_{t=1}^N P(t)}$$

CALIBRACIÓN

Función objetivo

Transformaciones para orientar el ajuste al rango de caudales de interés:

- ❖ **Función cuadrática**
(Mayor peso a caudales altos)
- ❖ **Función módulo**
(Mayor peso a caudales altos)
- ❖ **Función inversa**
(Mayor peso a caudales bajos)
- ❖ **Función relativa**
(Procura quitar peso a valores absolutos)
- ❖ **Función logarítmica**
(Mayor peso a caudales bajos)

$$F1 = \sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2$$

$$F2 = \sum_{t=1}^N |Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)|$$

$$F3 = \sum_{t=1}^N \left(\frac{1}{Q_{obs}(t)} - \frac{1}{Q_{sim}(t)} \right)^2$$

$$F4 = \sum_{t=1}^N \left[\frac{Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)}{Q_{obs}(t)} \right]^2$$

CALIBRACIÓN

Función objetivo

❖ Función multi-objetivo (G)

Combinación de las funciones anteriores (F_i), dependiendo de la importancia/peso (w_i) que se le asigne a las diferentes medidas de bondad del ajuste.

Algunas alternativas:

$$G = \sum_{i=1}^n w_i F_i$$

$$G = \sum_{i=1}^n w_i |F_i|$$

$$G = \sum_{i=1}^n w_i F_i^2$$

CALIBRACIÓN

Optimización de la función objetivo

- ❖ Dentro del proceso de calibración es necesario “optimizar” el ajuste entre la serie de caudales simulados y observados (ya sea mediante un ajuste manual o automático).
- ❖ La optimización se hace minimizando/maximizando la función objetivo:

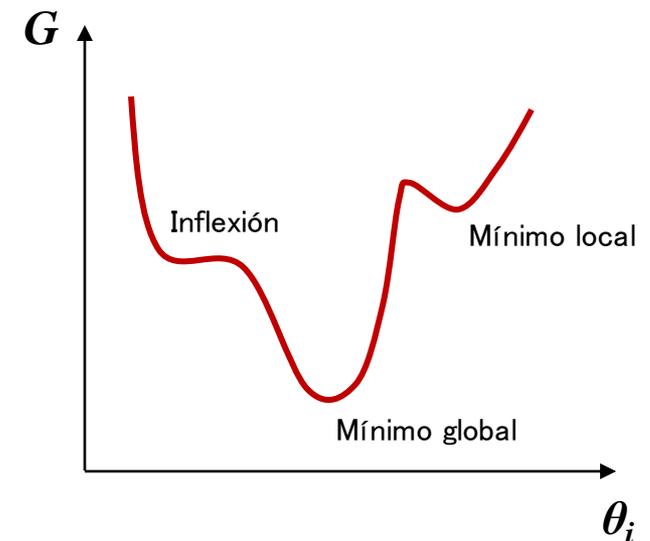
$$\frac{\partial G}{\partial X} = 0$$

Donde:

G : Función objetivo

X : Vector de parámetros del modelo (θ_i).

Sujeto a $\theta_{i,min} \leq \theta_i \leq \theta_{i,max} \quad \forall i = 1, \dots, n$



CALIBRACIÓN

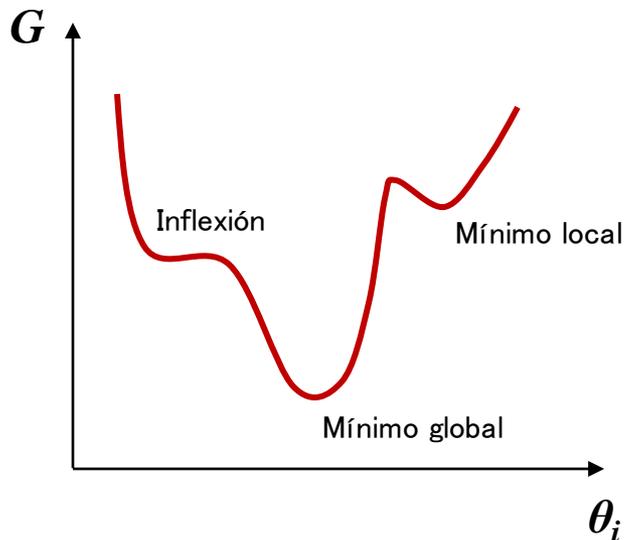
Optimización de la función objetivo

$$\frac{\partial G}{\partial X} = 0$$

G : Función objetivo

X : Vector de parámetros del modelo (θ_i).

Tantas dimensiones como parámetros...



¿Qué tan difícil es la calibración manual?

Prueba y error de todas las combinaciones de parámetros



Calibración automática:

Monte Carlo, Hill climbing, Likelihood, Least Squares, Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), Algoritmos genéticos (GA), ...

CALIBRACIÓN

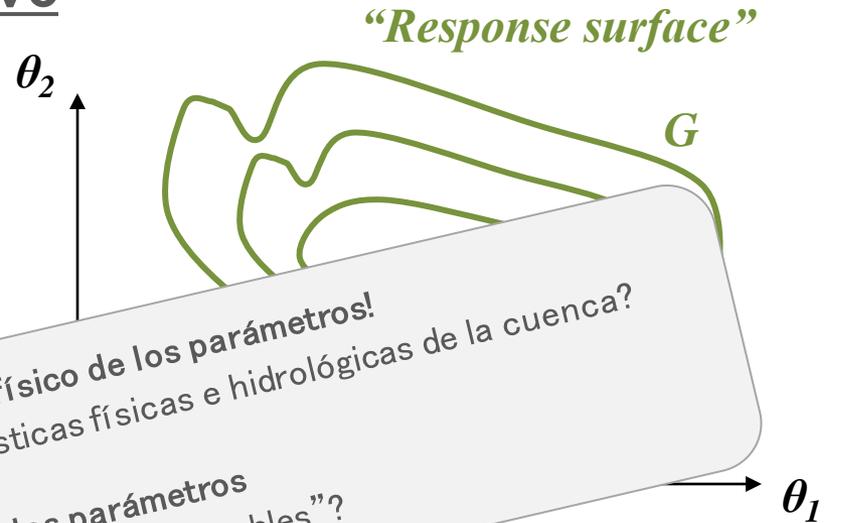
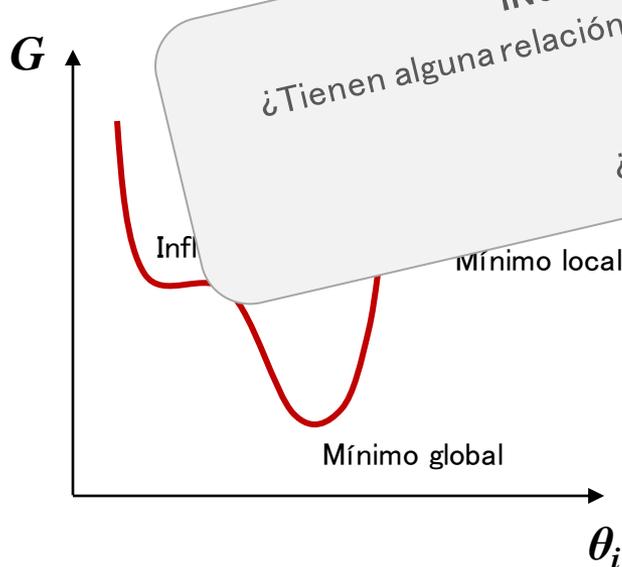
Optimización de la función objetivo

$$\frac{\partial G}{\partial X} = 0$$

G : Función objetivo

X : Vector de parámetros del modelo (θ_i).

Tantas dimensiones como parámetros



¿No olvidarse del sentido físico de los parámetros!
¿Tienen alguna relación con las características físicas e hidrológicas de la cuenca?
Valoración de los parámetros
¿Se encuentran en "rangos razonables"?

¿Por qué es la calibración manual?
Prueba y error de todas las combinaciones de parámetros



Calibración automática:

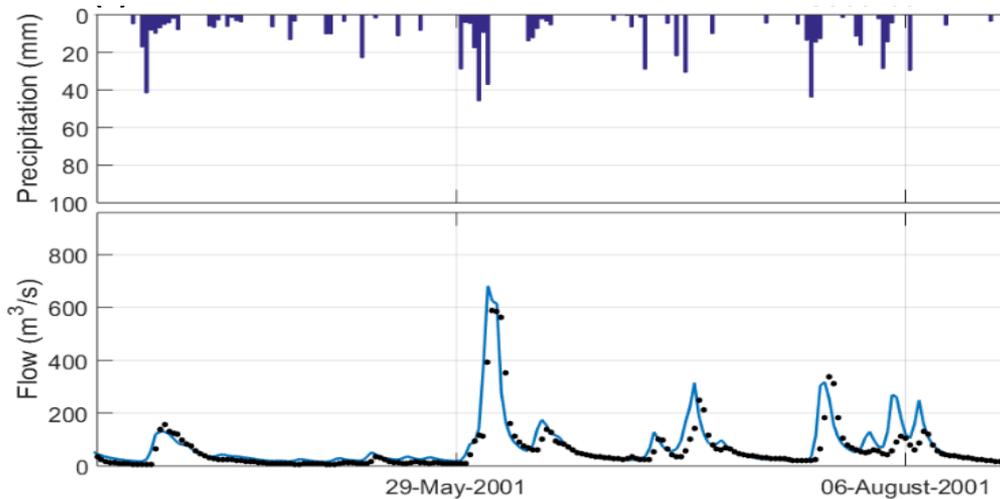
Monte Carlo, Hill climbing, Likelihood, Least Squares, Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), Algoritmos genéticos (GA), ...

CALIBRACIÓN

Desempeño del modelo ajustado

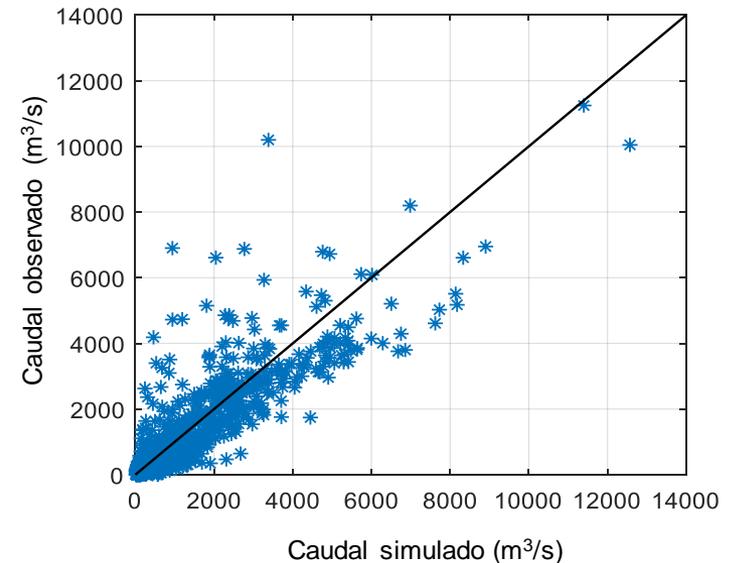
- ❖ ¿Los resultados del modelo “tienen sentido”?
- ❖ ¿El modelo logra reproducir el “comportamiento” de la serie observada?

Comparación visual de series temporales



Fuente: Narbondo et al., 2020.

Scatterplots



CALIBRACIÓN

Indicadores de desempeño

- ❖ ¿Los resultados del modelo “tienen sentido”?
- ❖ ¿El modelo logra reproducir el “comportamiento” de la serie observada?

Medidas cuantitativas de bondad del ajuste (estadísticos de comparación):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}$$

R^2 , NSE , ΔV , ...

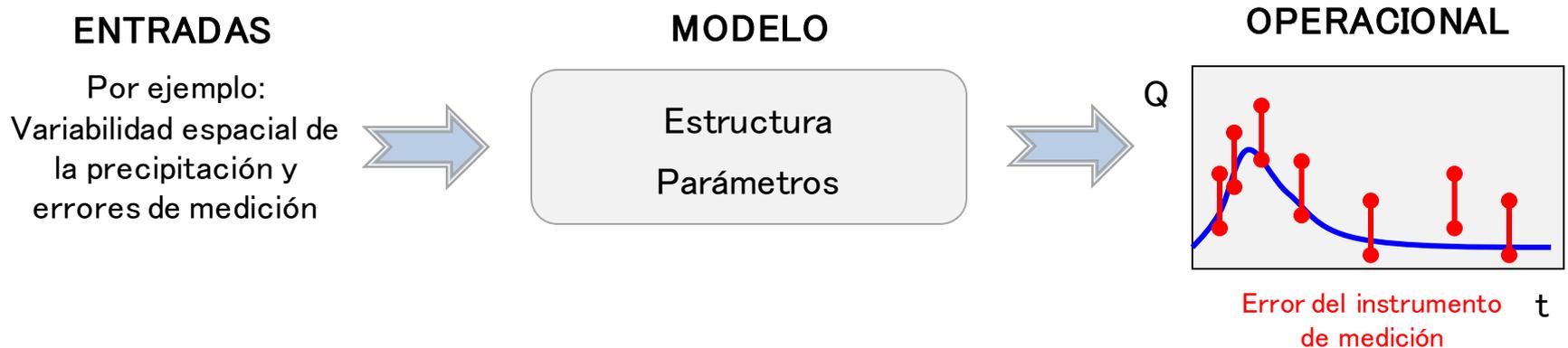
¿En qué se diferencian de las “funciones objetivo”?

CALIBRACIÓN

Incertidumbre

Fuentes principales de incertidumbre

- ❖ Operacional
- ❖ Variables de entradas al modelo
- ❖ Hidrológica
 - Estimación de parámetros
 - Estructura del modelo



(*) Tomado del curso “Optimización de modelos hidrológicos”, Prof: Willem Vervoort.

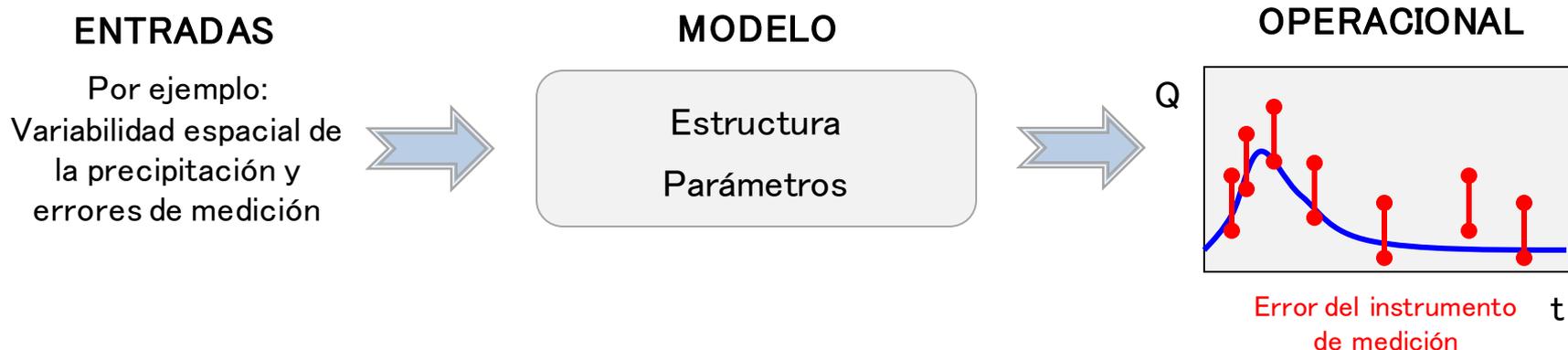
CALIBRACIÓN

Incertidumbre

Fuentes principales de incertidumbre

- ❖ Operacional
- ❖ Variables de entradas al modelo
- ❖ Hidrológica
 - Estimación de parámetros
 - Estructura del modelo

Las diferencias entre el modelo y la realidad se deben a la combinación de todas estas fuentes.
El proceso de calibración puede minimizar las tres primeras; sin embargo, no altera la cuarta.



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Concepto

- ❖ ¿Qué pasa si el modelo tiene muchos parámetros?
- ❖ ¿Quizás solo deberías concentrarte en unos pocos?
- ❖ ¿Qué parámetros tienen mayor influencia en los resultados del modelo?



Análisis de sensibilidad

La “eficiencia” del proceso de calibración se puede aumentar concentrándose en ajustar los parámetros para los cuales los resultados del modelo son más sensibles.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Concepto

¿Cuánto cambia el resultado del modelo debido a la variación en uno de los parámetros (θ_i)?

- ❖ **Análisis de sensibilidad:** Evalúa cómo las variaciones en los parámetros del modelo afectan el resultado del mismo.
- ❖ La sensibilidad (S_i) puede expresarse en relación a las salidas del modelo (Z) o a alguna medida de la bondad del ajuste (G):

$$S_i = \frac{dZ}{d\theta_i} \quad S_i = \frac{dG}{d\theta_i}$$

- ❖ Índice de sensibilidad normalizado (Beven, 2001): $S_i = \frac{dZ/d\theta_i}{\theta_i}$
- ❖ **Análisis Local** (variación de un parámetro por vez) vs **Análisis Global** (muestreo aleatorio en todo el espacio de parámetros: métodos SOBOL, MORRIS, ...).

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Evaluación del desempeño

¿Qué tan bueno es el desempeño del modelo ajustado?

La calibración sola no es suficiente, se necesita verificar la validez del ajuste considerando un conjunto de datos independientes.

- ❖ Se emplean los mismos indicadores de desempeño (medidas de bondad del ajuste) que para la calibración: R^2 , NSE, RMSE, ΔV , etc.

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Evaluación del desempeño

¿Qué tan bueno es el desempeño del modelo ajustado?

La calibración sola no es suficiente, se necesita verificar la validez del ajuste considerando un conjunto de datos independientes.

- ❖ Se emplean los mismos indicadores de desempeño (medidas de bondad del ajuste) que para la calibración: R^2 , NSE, RMSE, ΔV , etc.
- ❖ ¿Por qué es de esperar que los resultados de la validación no sean tan buenos como los de la calibración?

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Evaluación del desempeño

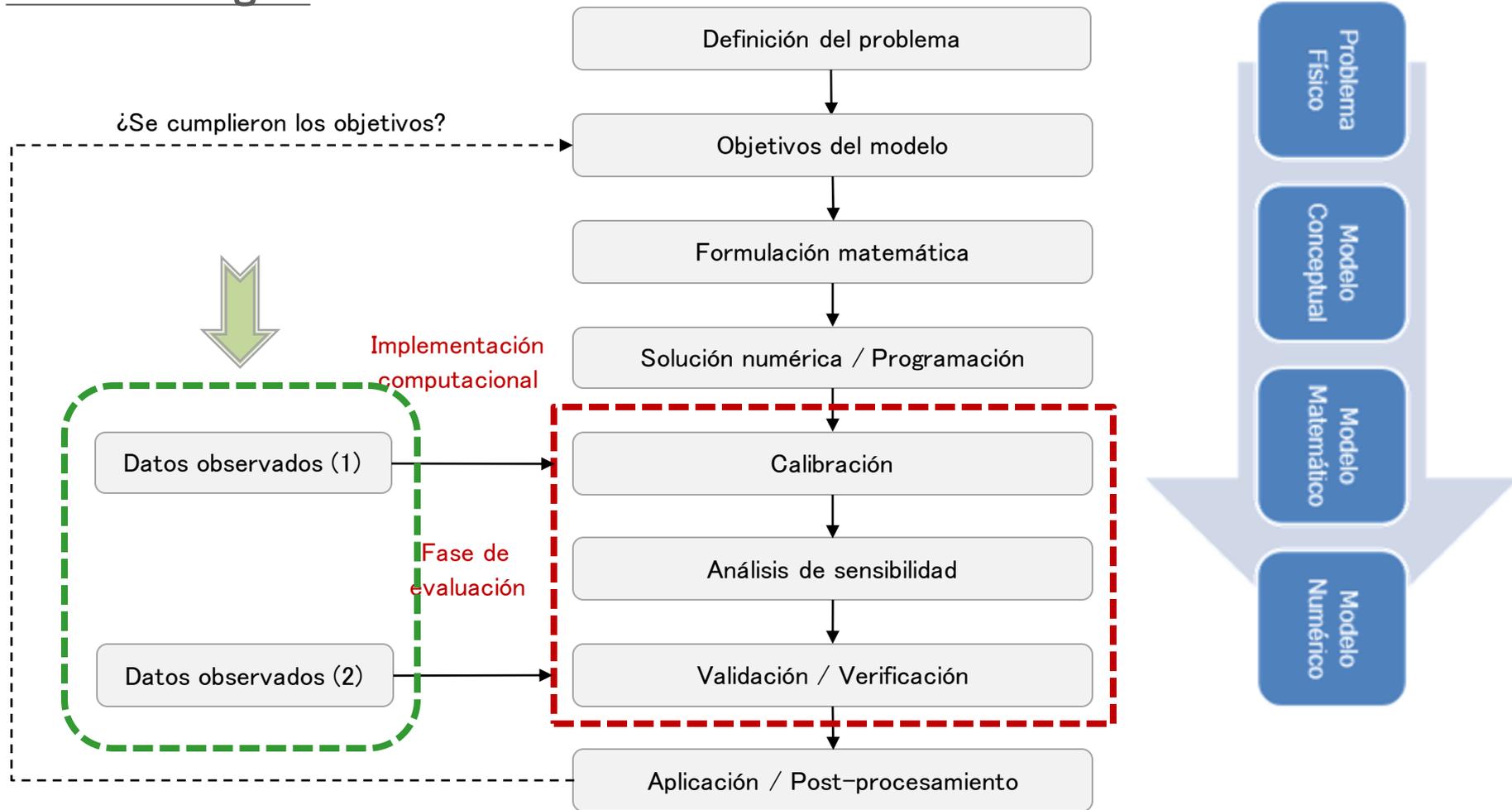
¿Qué tan bueno es el desempeño del modelo ajustado?

La calibración sola no es suficiente, se necesita verificar la validez del ajuste considerando un conjunto de datos independientes.

- ❖ Se emplean los mismos indicadores de desempeño (medidas de bondad del ajuste) que para la calibración: R^2 , NSE, RMSE, ΔV , etc.
- ❖ ¿Por qué es de esperar que los resultados de la validación no sean tan buenos como los de la calibración?
 - Los parámetros se ajustaron para “forzar” el modelo a los datos observados durante el periodo de calibración.
 - Las tendencias observadas en los datos no se pueden capturar en los modelos de precipitación-caudal.

PROCESO DE MODELACIÓN

Pasos a seguir



(* Adaptado de Popescu (2014), "Computational Hydraulics".

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

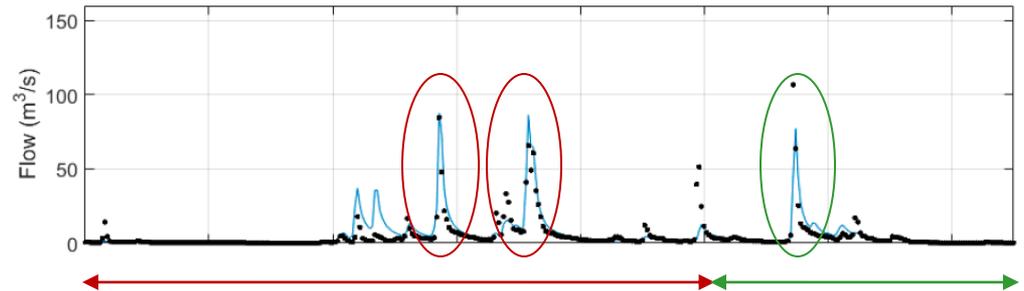
Evaluación del desempeño

Simulación por eventos

- ❖ Selección de eventos representativos de las condiciones de aplicación (déficit o exceso hídrico)

Simulación continua

- ❖ “Split-test”
- ❖ Calibración/Validación cruzada
 - Validación cruzada de K iteraciones (k-fold partitioning)
 - Validación cruzada dejando uno fuera (LOOCV)
- ❖ “Bootstrapping”



VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Evaluación del desempeño



Simulación continua:

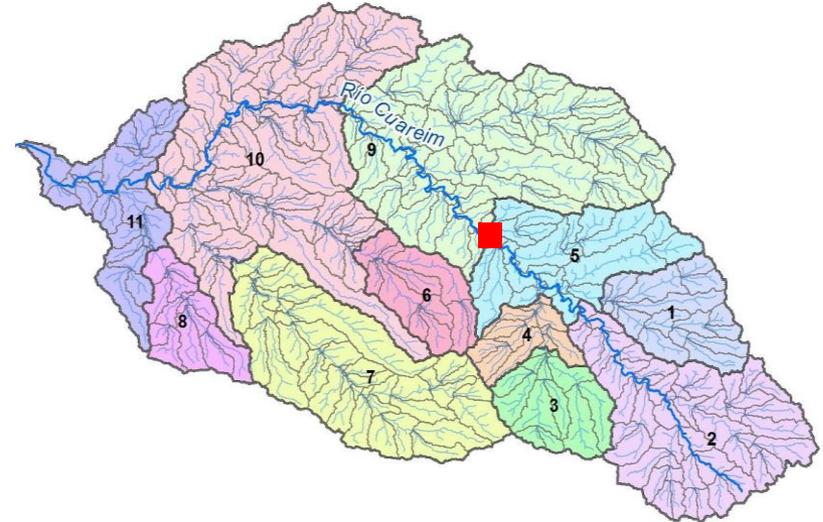
- ❖ “Split-test”: Subdivisión de la muestra en dos partes, que serán usadas en la calibración y validación/verificación del modelo.
- ❖ Calibración/Validación cruzada (CV): Consiste en dejar afuera una “sección” de los datos disponibles, calibrar con los datos restantes, simular dicha “sección” y evaluar el desempeño del modelo. Repetir el procedimiento para todas las “secciones” disponibles.
“Sección”: subconjunto de datos en el tiempo (mes, año, etc.) o en el espacio (cuenca).
- ❖ “Bootstrapping”: Remuestreo aleatorio (con repetición) del conjunto de datos a emplear para la calibración. Se repite el procedimiento muchas veces para construir una función de distribución de probabilidad del error del modelo.

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Ejemplo: Modelo MGB-IPH (*)

Aplicación a la cuenca del río Cuareim

Área de la cuenca: 4.640 km²



Calibración:

Período: 01/01/2001 – 31/12/2004

Ajuste manual.

Función Objetivo: R^2 , NSE y ΔV

Validación:

Períodos:

01/05/2005 – 30/11/2005

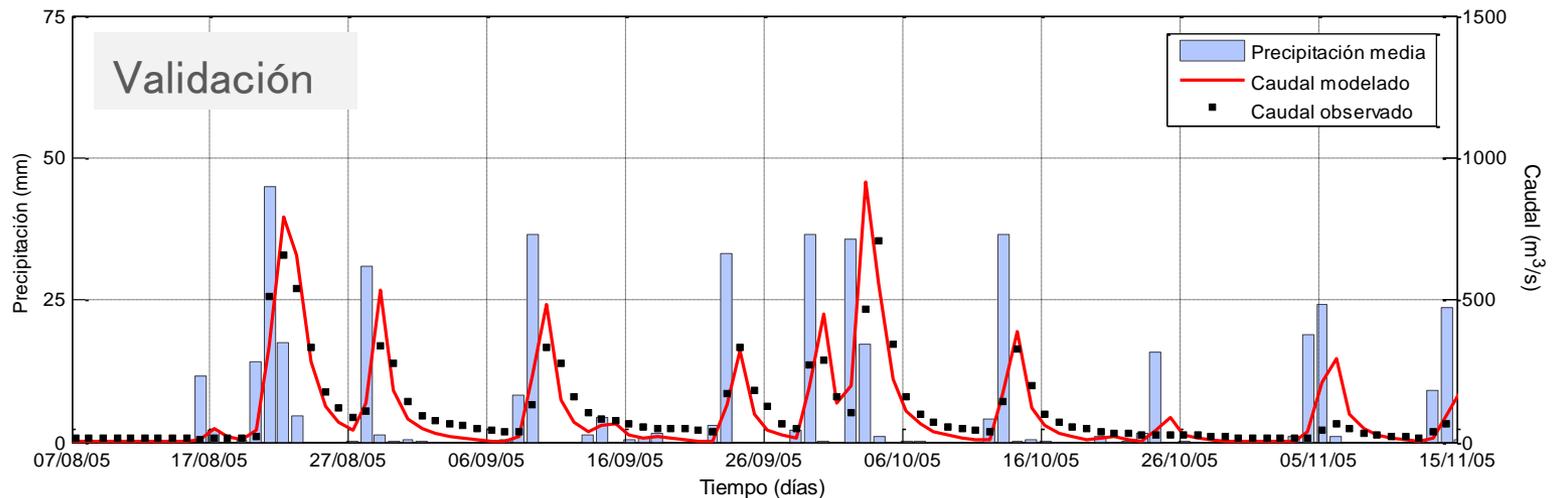
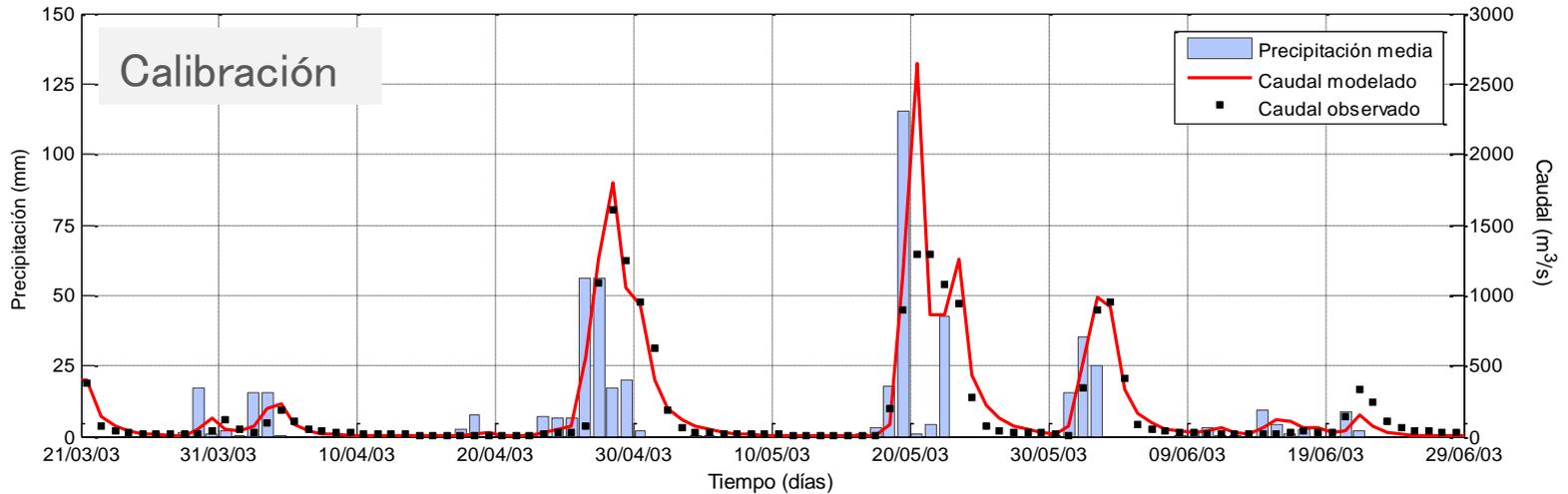
01/07/2007 – 31/12/2007

Desempeño del modelo:

| Indicador | Calibración (2001–2004) | Validación | |
|------------|----------------------------|------------|-------|
| | | 2005 | 2007 |
| R^2 | 0.89 | 0.89 | 0.91 |
| NSE | 0.80 | 0.76 | 0.81 |
| ΔV | 4.10 | -3.70 | -9.32 |

VALIDACIÓN / VERIFICACIÓN

Ejemplo: Modelo MGB-IPH



REGIONALIZACIÓN

Calibración regional y validación en el espacio

PROBLEMA:

Presencia de cuencas
no aforadas

OBJETIVO:

Disponer de una relación
precipitación–escorrentía en
cualquier cuenca del país



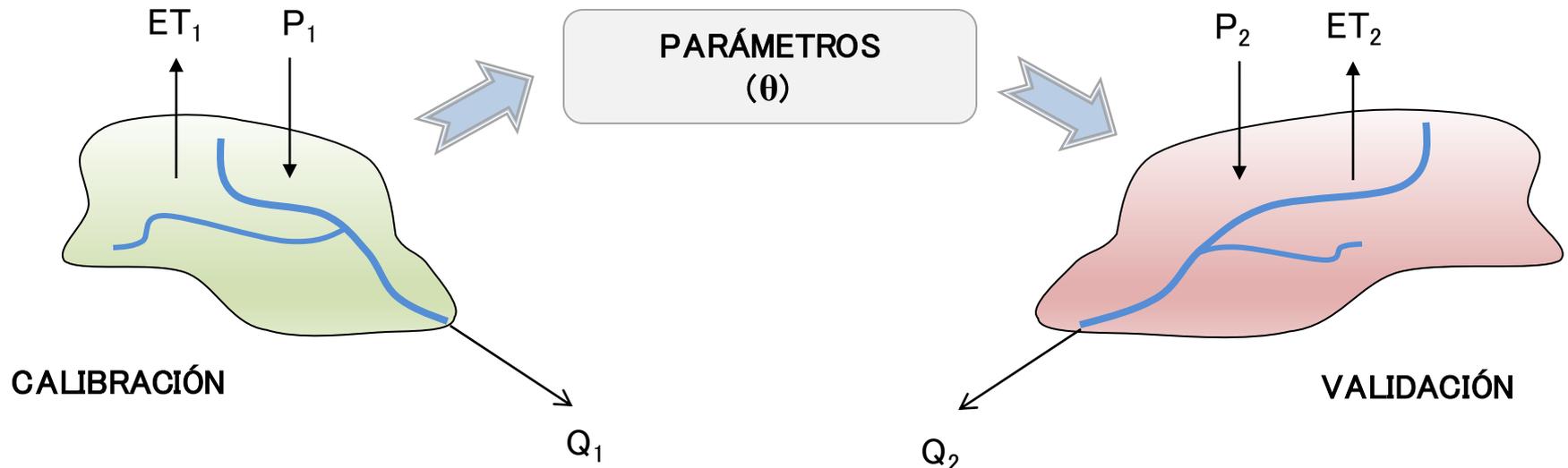
REGIONALIZACIÓN:

Parámetros válidos para todo el Uruguay.
Permite estimar el caudal en cuencas no
aforadas en todo el país.

REGIONALIZACIÓN

Calibración regional y validación en el espacio

- ❖ Objetivo: Disponer de un modelo hidrológico “ajustado” para cuencas no aforadas.
- ❖ Procedimiento análogo a la validación en el tiempo, pero aplicado a otras cuencas (distintas a la(s) considerada(s) para la calibración).
- ❖ ¿Similaridad física de las cuencas?



Aspectos prácticos en el uso de modelos hidrológicos

- ❖ Objetivo del estudio
- ❖ Características de la cuenca
- ❖ Disponibilidad de información
- ❖ Familiaridad con el modelo
- ❖ Comunidad científica

SÍNTESIS

Objetivo del estudio

- ❖ El uso de los modelos está directamente relacionado con los objetivos del estudio. El modelo por sí sólo no es un objetivo, sino una herramienta para alcanzar un objetivo.
- ❖ Condicionan la elección del modelo.
- ❖ Dado que todo modelo tiene limitaciones para representar perfectamente todos los procesos, es necesario ser pragmático en su aplicación, priorizando los objetivos del estudio.
- ❖ Un modelo con muchos parámetros puede ser ineficiente cuando el problema no exige gran detalle de los procesos.

Principio de Parsimonia:

“Lo más simple posible con los datos disponibles”

SÍNTESIS

Características de la cuenca

- ❖ Los modelos hidrológicos han sido desarrollados en diferentes cuencas, con la visión y experiencia de quienes los formularon, priorizando los procesos hidrológicos dominantes del caso.
- ❖ La variabilidad de las características físicas y climáticas es muy grande.
- ❖ Un mismo modelo difícilmente aplica a todos los sistemas.
- ❖ En algunos casos, el modelo debe tener la capacidad para representar espacialmente los procesos y las características físicas de la cuenca.
- ❖ Es necesario conocer las ventajas y desventajas de cada modelo.

No existe un modelo universal óptimo que se adapte a todas las situaciones y resuelva todos los problemas, sino que por el contrario, es necesario encontrar aquel modelo que mejor represente los procesos hidrológicos más significativos en cada zona de estudio, para los objetivos planteados y en función de la información disponible.

SÍNTESIS

Disponibilidad de información

- ❖ Los (no) datos existentes puede inviabilizar el uso de algunas metodologías más sofisticadas que exijan mucha información.
- ❖ Modelos que requieren pocos parámetros (¿con sentido físico?) pueden ser más útiles.
- ❖ En cuencas no aforadas: los parámetros pueden estimarse en base a series de caudal en cuencas vecinas con características semejantes (cobertura, geología, suelos, red de drenaje) o en base a información sobre las características físicas de la cuenca y a rangos de variación posible en base a la literatura.
- ❖ Fuentes de información:
 - Mediciones de campo
 - Productos de sensoramiento remoto

Cantidad y calidad de la información disponible

SÍNTESIS

Familiaridad con el modelo

Usuario

- ❖ El “mejor modelo” suele ser aquel con el que el usuario está más familiarizado (*), dentro de los modelos “técnicamente aplicables” al problema.

(*) Dominio acerca de la sensibilidad de los parámetros y sus efectos sobre los procesos hidrológicos en el hidrograma de una cuenca.

Comunidad científica

- ❖ Qué tan difundido está el modelo?
- ❖ Existe una comunidad científica detrás con experiencia en su uso?
- ❖ Foros de discusión.

MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

Bibliografía

Libros

- ❖ Bedient P.B., Huber W.C. (2002). “Hydrology and Floodplain Analysis”. Third Edition. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ. ISBN: 0-13-132222-9.
- ❖ Beven K. (2001). “Rainfall – Runoff Modelling: The Primer”. Published by Wiley. ISBN-13: 978-0-471-98553-2, ISBN: 0-471-98553-8.
- ❖ Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. (1994). “Hidrología Aplicada”. McGraw-Hill. ISBN: 958-600-171-7.
- ❖ Duan Q., Pappenberger F., Wood A., Cloke H., Schaake J. (2019). “Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting”. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39925-1> (Part IV: Hydrological Models)
- ❖ Popescu I. (2014). “Computational hydraulics: Numerical methods and modelling”. IWA Publishing. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780400457>
- ❖ Tucci C. (1998). “Modelos hidrológicos”. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

Bibliografía

Artículos científicos (1)

- ❖ Bennett N.D., Croke B.F.W., Guariso G., Guillaume J.H.A., Hamilton S.H., Jakeman A.J., ... Andréassian V. (2013). “Characterising performance of environmental models”. *Environmental modelling & software*, 40, 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>.
- ❖ Beven K., Young P. (2013). “A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees”. *Water Resour. Res.*, 49, 5092–5098, DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20393>.
- ❖ Fenicia F., Kavetski D., Savenije H.H.G. (2011). “Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development”. *Water Resour. Res.*, 47, W11510. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR010174>.
- ❖ Gayathri K.D., Ganasri B.P., Dwarakish G.S. (2015). “A review on hydrological models”. *Aquatic Procedia* 2015, 4, 1001–1007, ISSN 2214–241X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aapro.2015.02.126>.
- ❖ Hrachowitz M., Clark M. P. (2017). “HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3953–3973. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>.
- ❖ Jajarmizadeh M., Harun S., Salarpour M. (2012). “A review on theoretical consideration and types of models in hydrology”. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5: 249–261. DOI: <https://doi.org/10.3923/jest.2012.249.261>.
- ❖ Pushpalatha R., Perrin C., Le Moine N., Andréassian V. (2012). “A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations”. *Journal of Hydrology*, 420–421, 171–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.055>.

MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

Bibliografía

Artículos científicos (2)

- ❖ Sitterson J., Knightes C., Parmar R., Wolfe K., Muche M., Avant B. (2017). “An overview of rainfall–runoff model types”. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC, EPA/600/R–17/482. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=339328&Lab=NERL.
- ❖ Vilaseca F., Castro A., Chreties Ch., Gorgoglione A. (2022). “Comparación de modelos SWAT y Random Forest para simular el proceso precipitación–escorrentía en la cuenca del río Santa Lucía Chico”. Congreso Latinoamericano de Hidráulica (IAHR), Brasil, 2022.
- ❖ Vilaseca F., Narbondo S., Chreties C., Castro A., Gorgoglione A. (2023). “Simulación del proceso precipitación–escorrentía con paso diario: comparación de los modelos GR4J, SWAT y Random Forest”. Ribagua, 10(1), 31–47. <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2238127>
- ❖ Wang A., Solomatine D.P. (2019). “Practical Experience of Sensitivity Analysis: Comparing Six Methods, on Three Hydrological Models, with Three Performance Criteria”. Water 2019, 11(5), 1062. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11051062>.