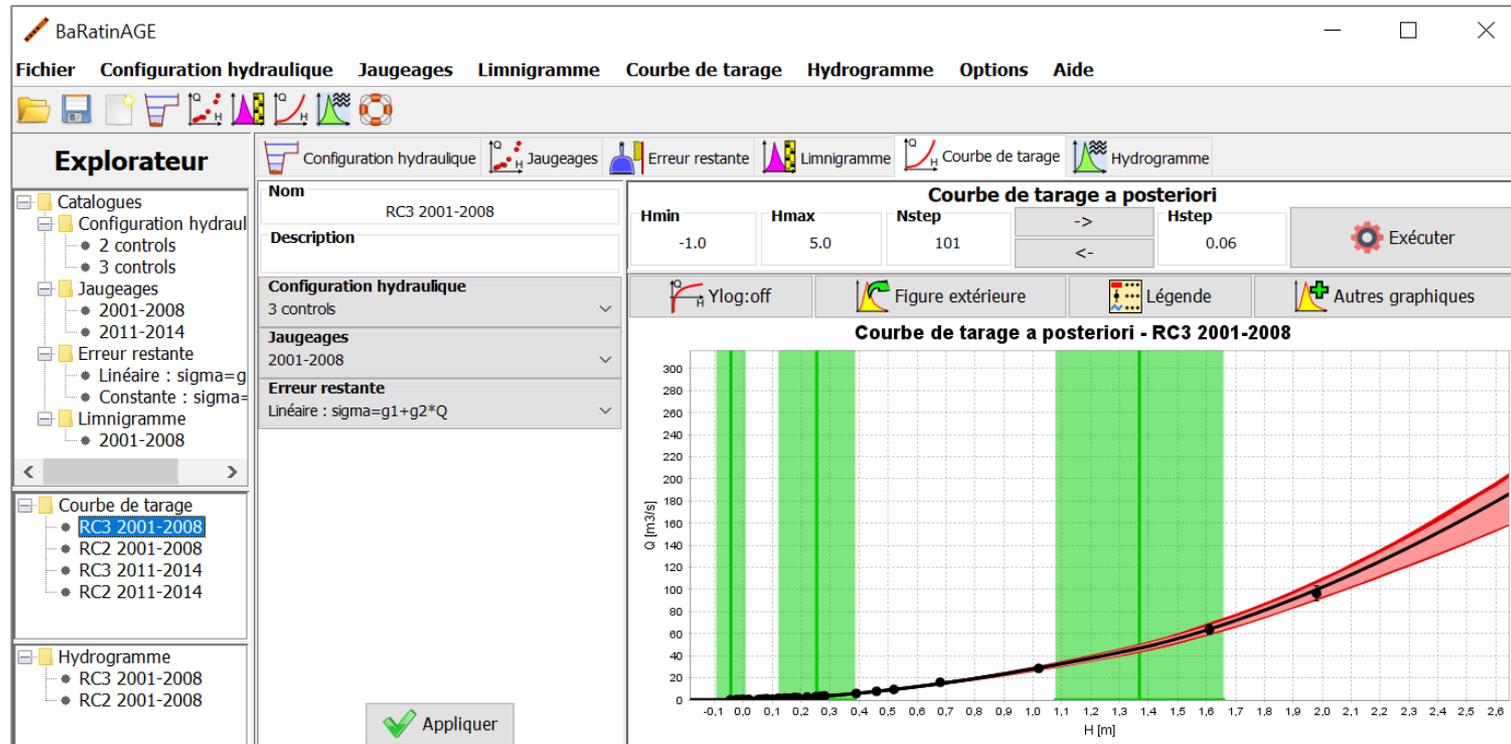


julio 2022



Establecer una curva de gasto y un hidrograma con incertidumbres: trabajo práctico con el software BaRatin

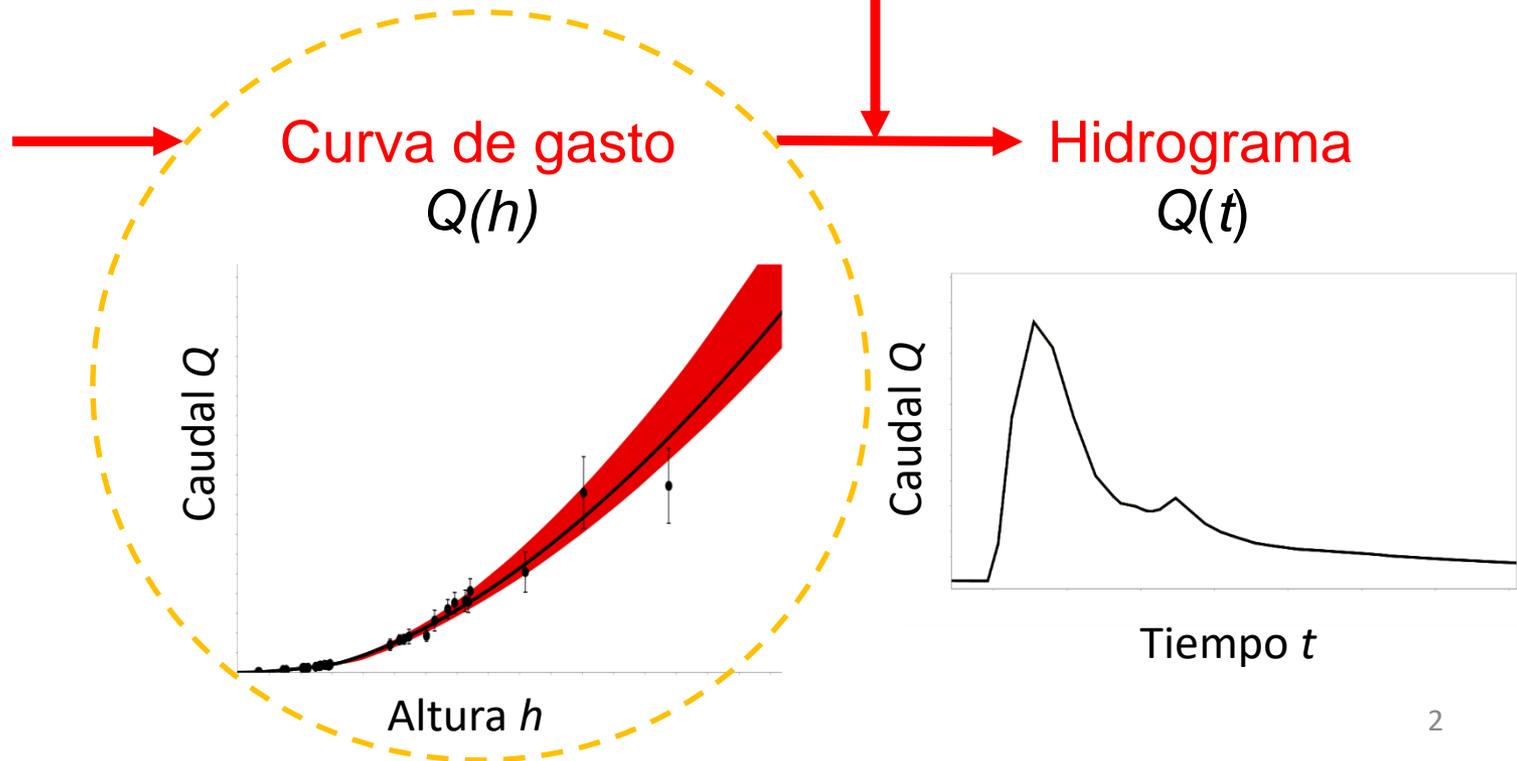
Jérôme LE COZ, Felipe MENDEZ-RIOS  
INRAE, UR RiverLy, Hidraulica de los Rios, Lyon, Francia

INRAE

# Producir series hidrométricas *probabilísticas*



Aforos  
( $Q_i, h_i$ )



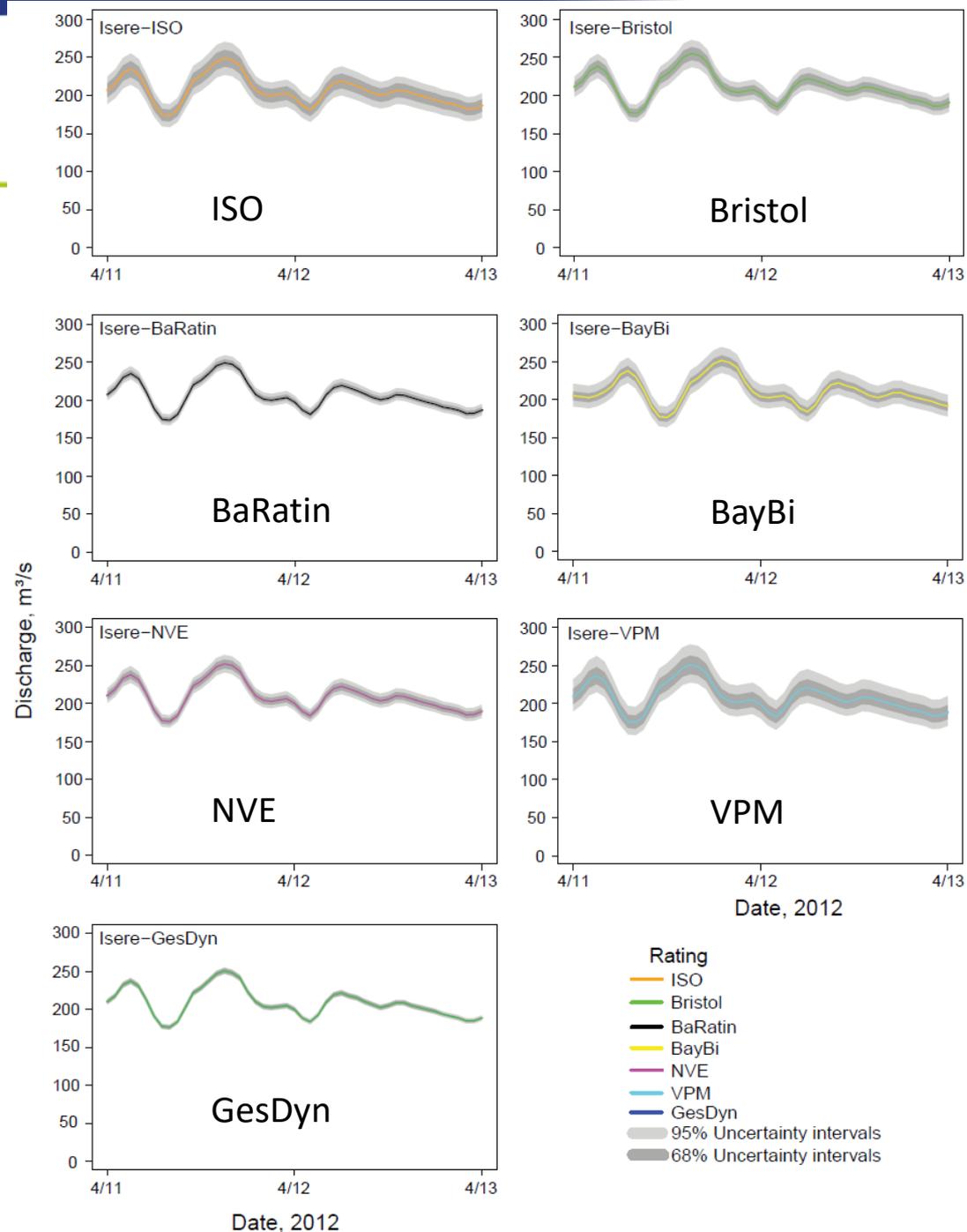
# Intercomparación de 7 métodos

Dificultad para comparar y homogeneizar los métodos.

El significado de los resultados depende de las hipótesis realizadas por cada método.

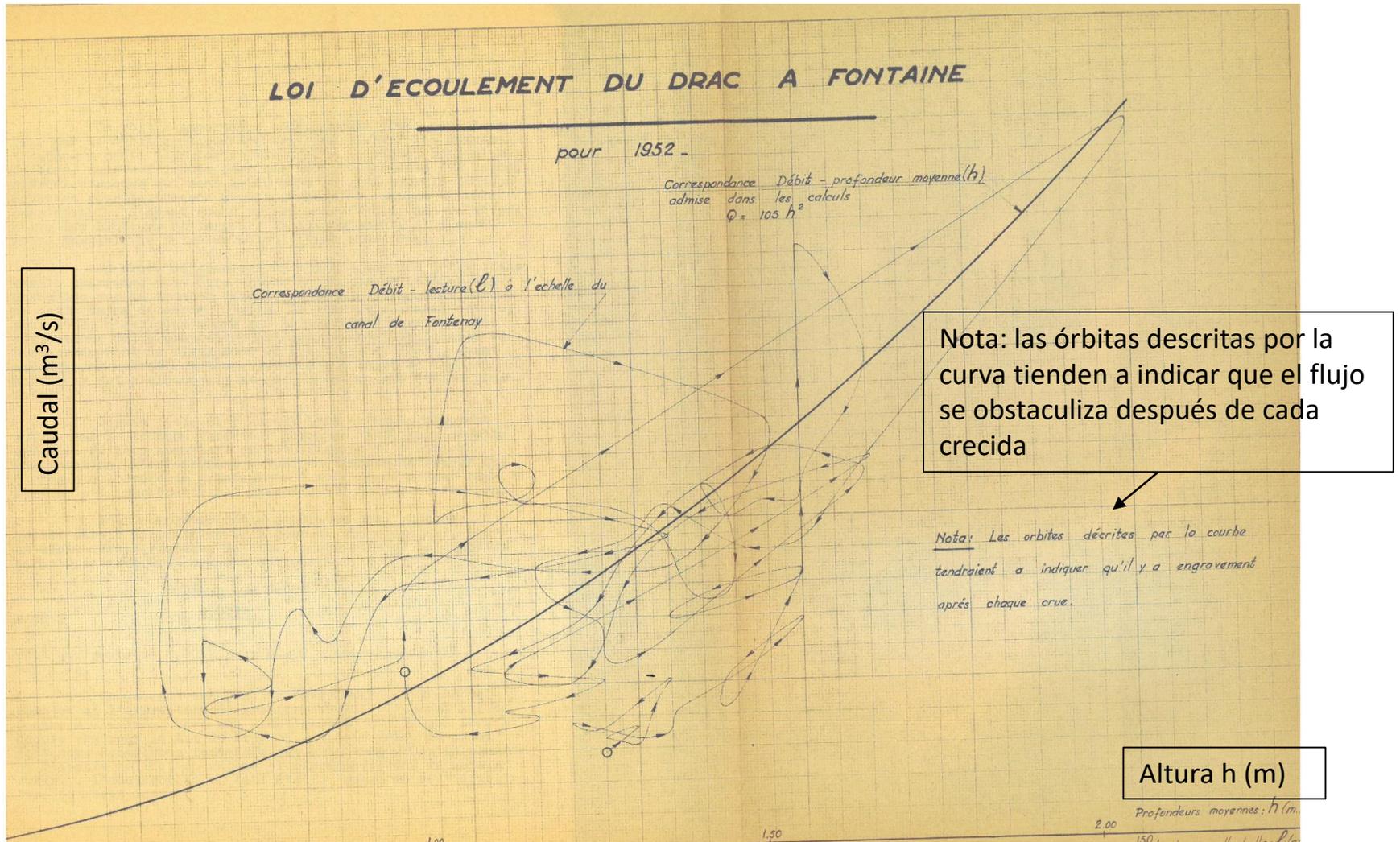
Intervalos de incertidumbre del 95% para los hidrogramas del río Isère, Grenoble.

Kiang et al., WRR (2018)



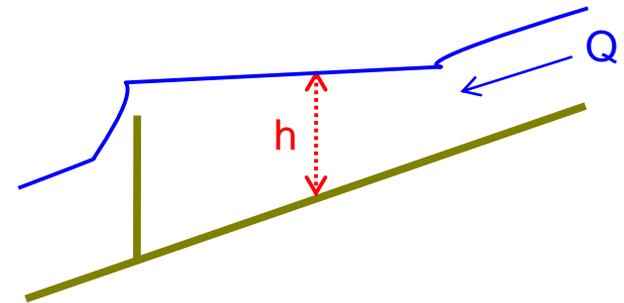
# Controles hidráulicos

¿Por qué necesitamos una base física para las curvas de gastos?



# Controles hidráulicos

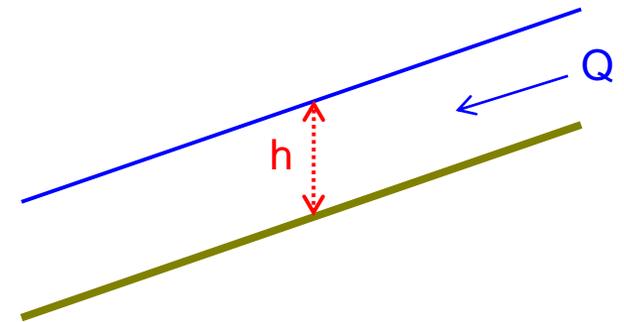
- Propiedades físicas de un canal que determinan la relación entre la altura y el caudal en un punto (OMM, 2012).



Control hidráulico tipo sección

# Controles hidráulicos

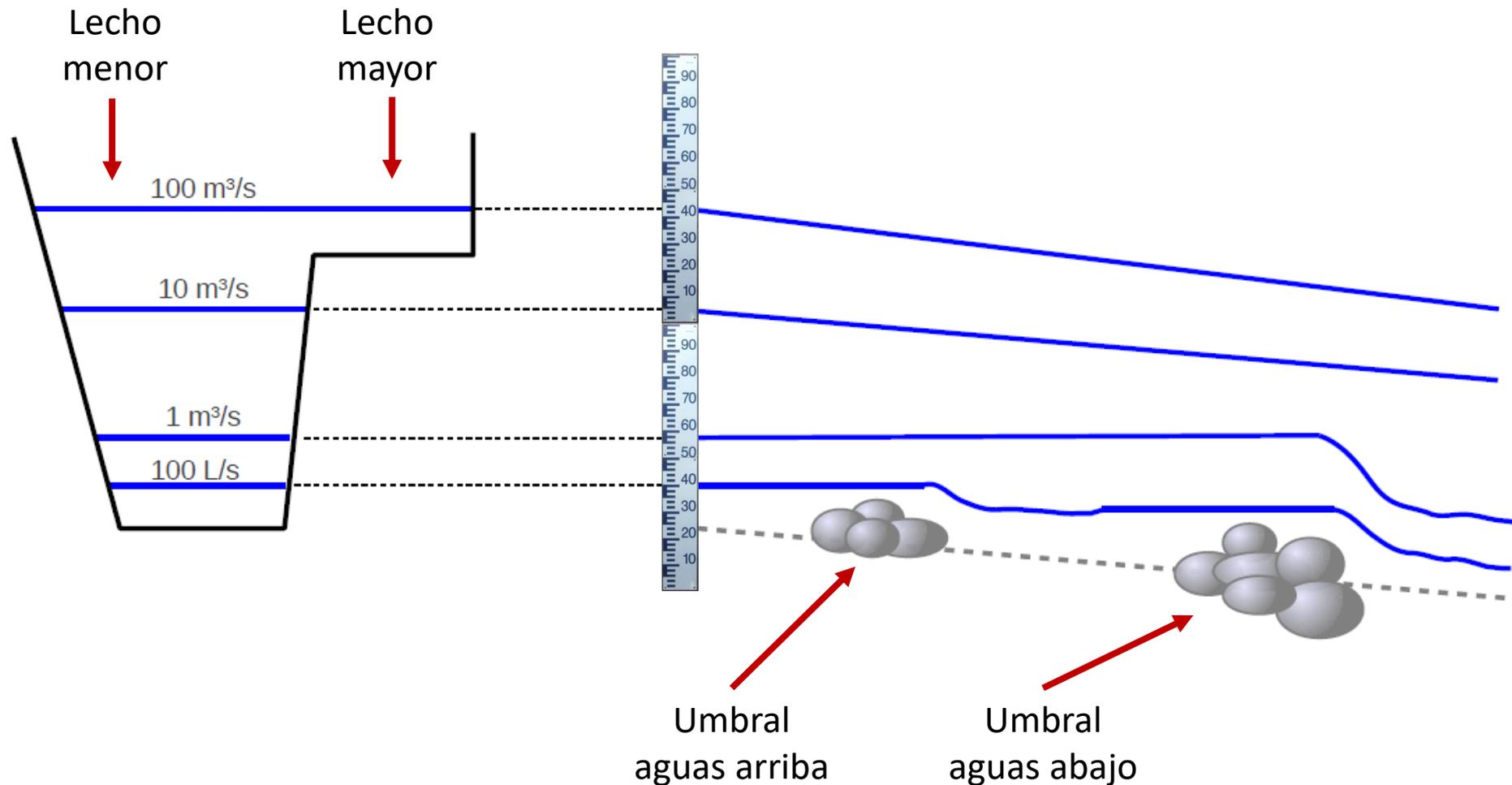
- Propiedades físicas de un canal que determinan la relación entre la altura y el caudal en un punto (OMM, 2012).



Control hidráulico  
tipo canal

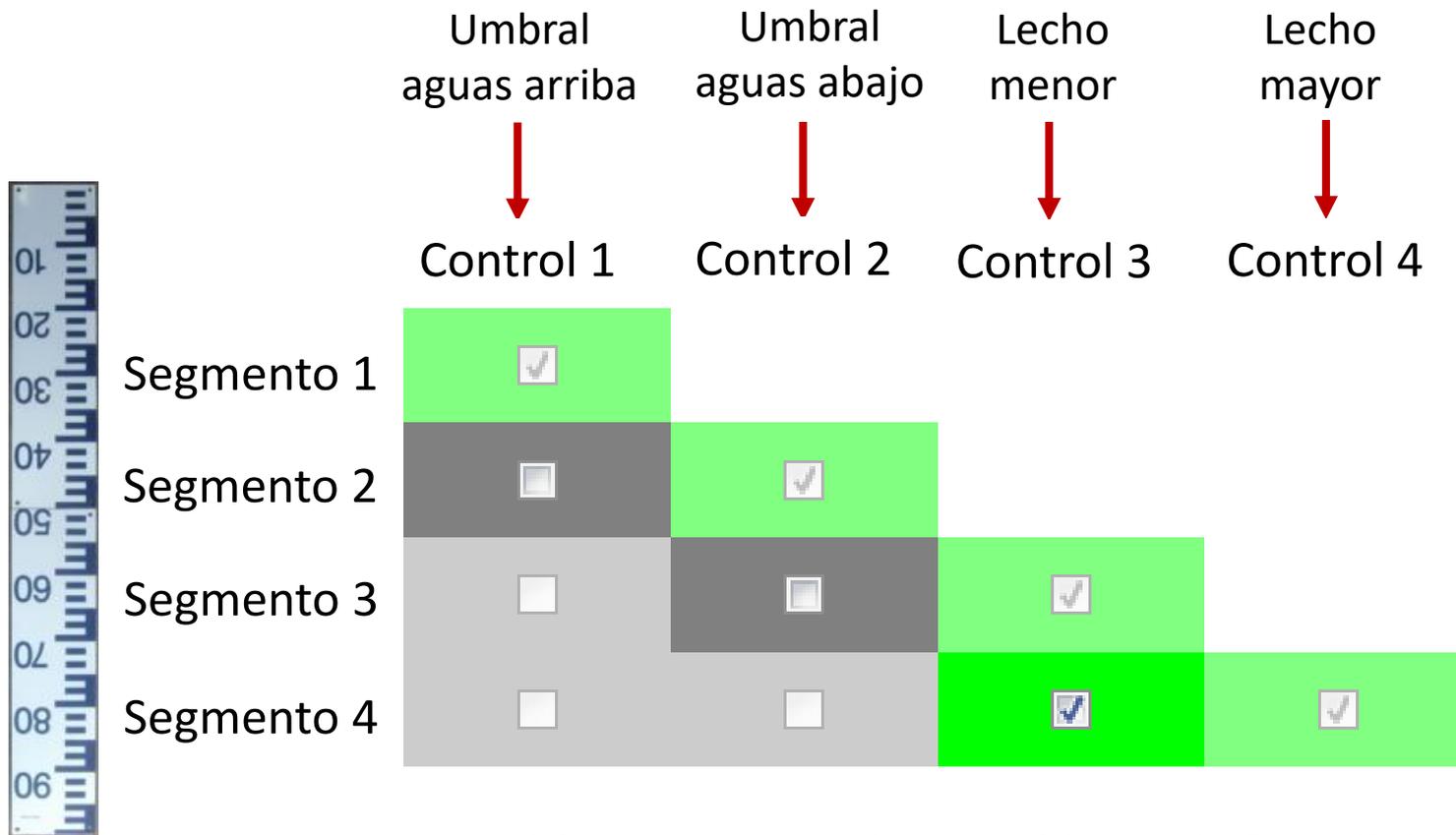
# Controles hidráulicos

Los controles se suceden, sustituyendo o añadiendo unos a otros



# Controles hidráulicos

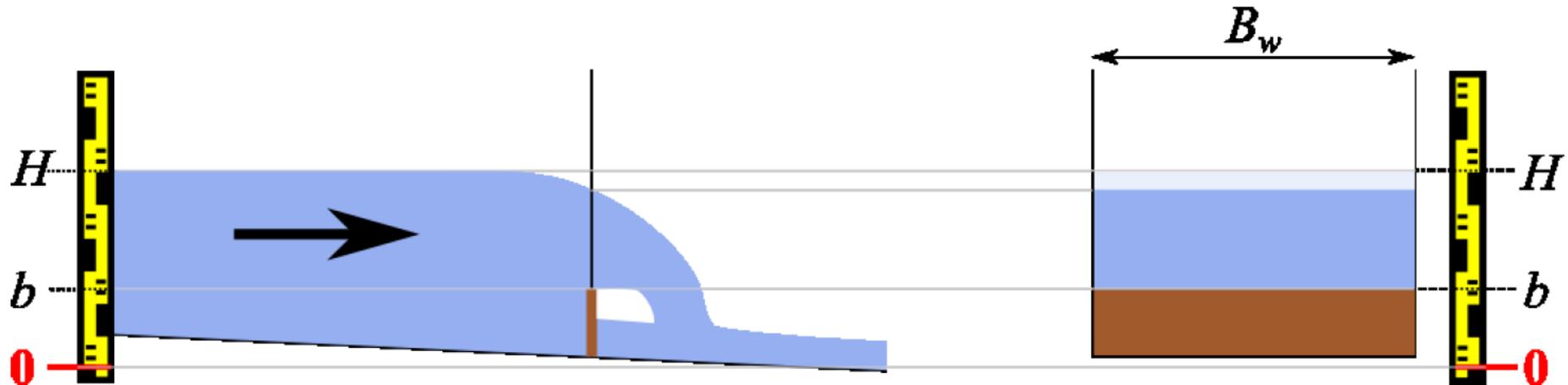
Los controles se suceden, sustituyendo o añadiendo unos a otros



*Matriz de controles, o « Matriz de Bonnifait »*

# Controles hidráulicos tipo en BaRatin

- Vertedero rectangular / vertedero natural (umbral)

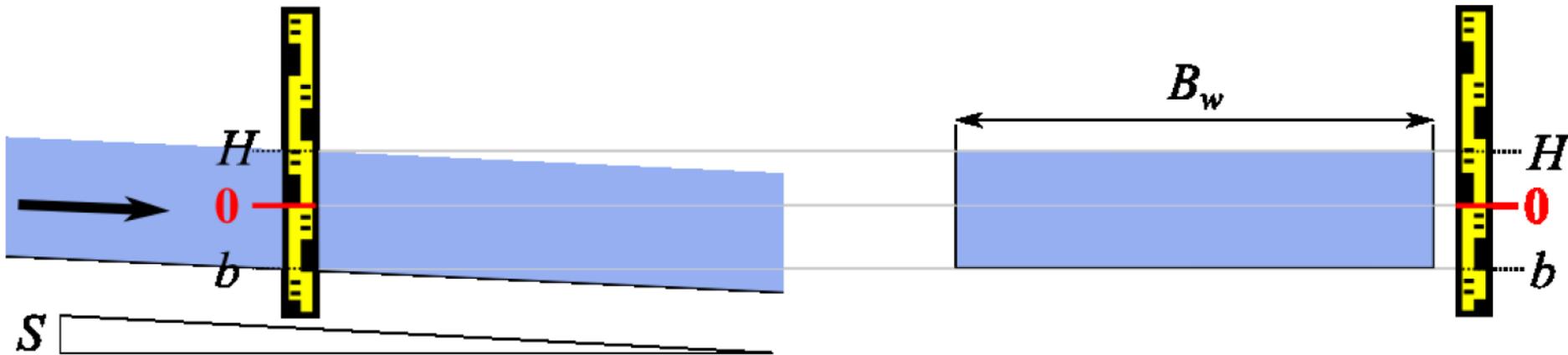


$$Q(H) = C_r \sqrt{2g} B_w (H - b)^c$$

con  $C_r$  = coeficiente de descarga,  $g$  = gravedad y exponente  $c = 1.5$

# Controles hidráulicos tipo en BaRatin

- Canal rectangular (régimen uniforme, canal ancho)

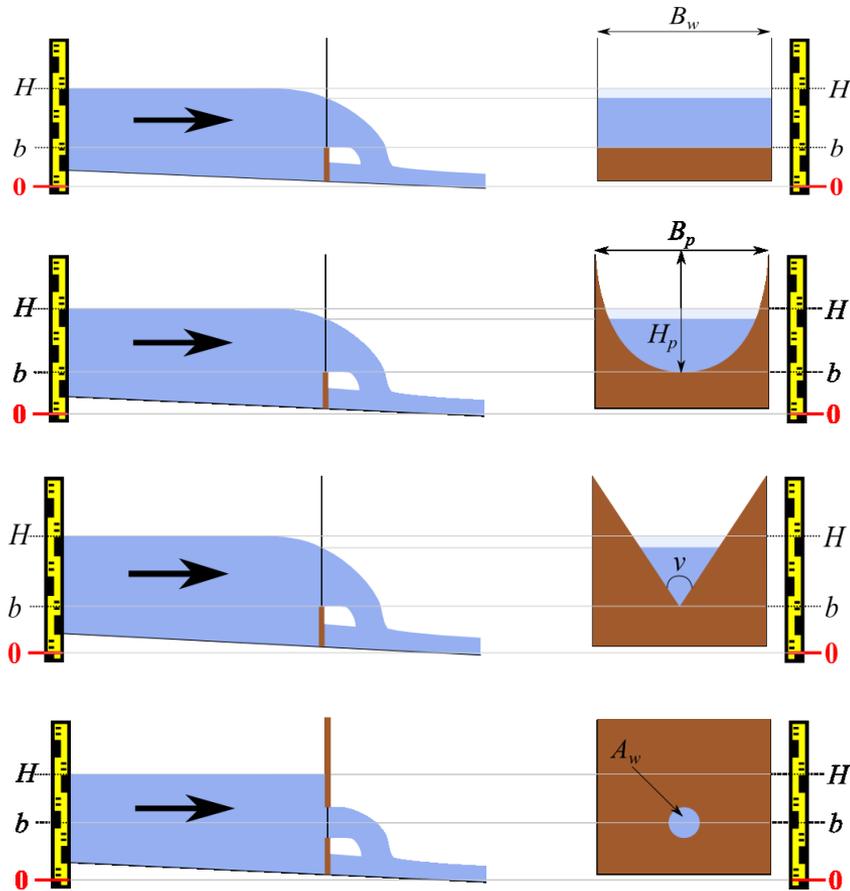


$$Q(H) = K_S \sqrt{S} B_w (H - b)^c$$

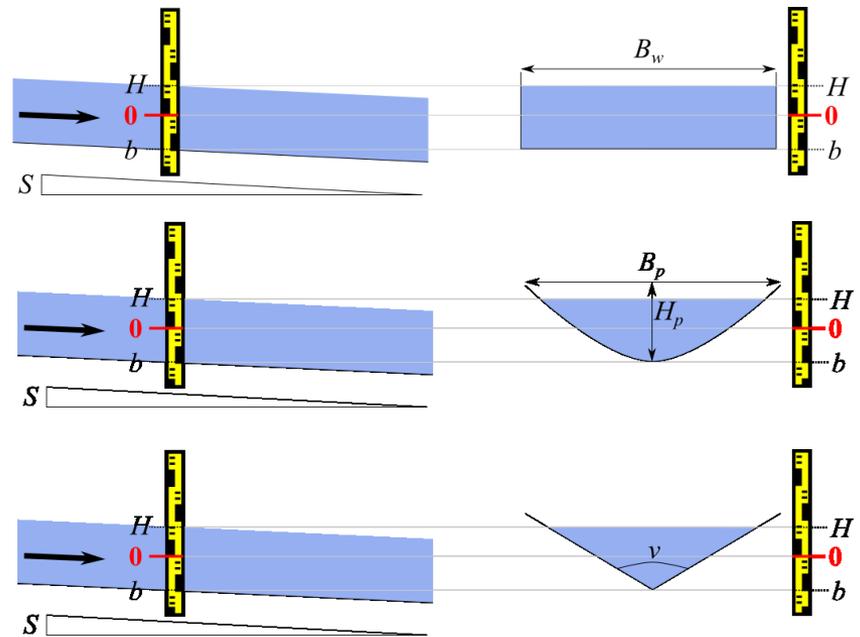
con  $K_S$  = coeficiente de Strickler (fricción) y exponente  $c = 1.67$

# Controles hidráulicos tipo en BaRatin

## Control tipo sección



## Control tipo canal



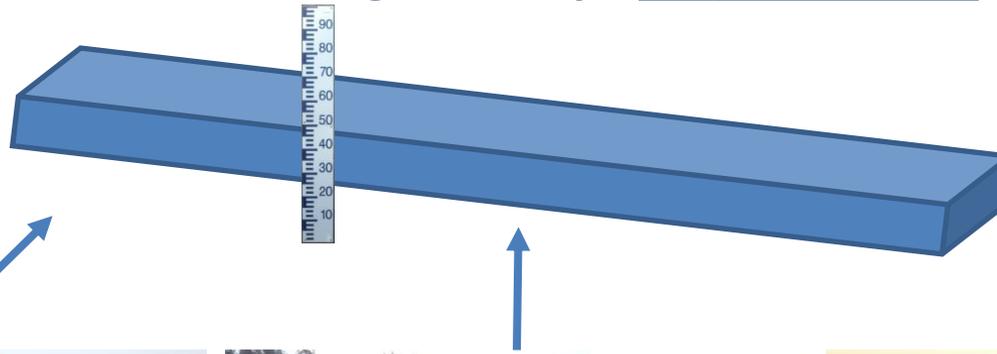
Controles "libres"

$$Q = a(h - b)^c$$

# Aproximaciones de los controles naturales

Un control tipo canal es modelizado por un canal uniforme equivalente.

- *Atención! La geometría de un control tipo canal es un promedio sobre el tramo que se extiende aguas abajo y aguas arriba de la estación.*



River Derwent, Reino Unido



Upper Truckee River, EEUU

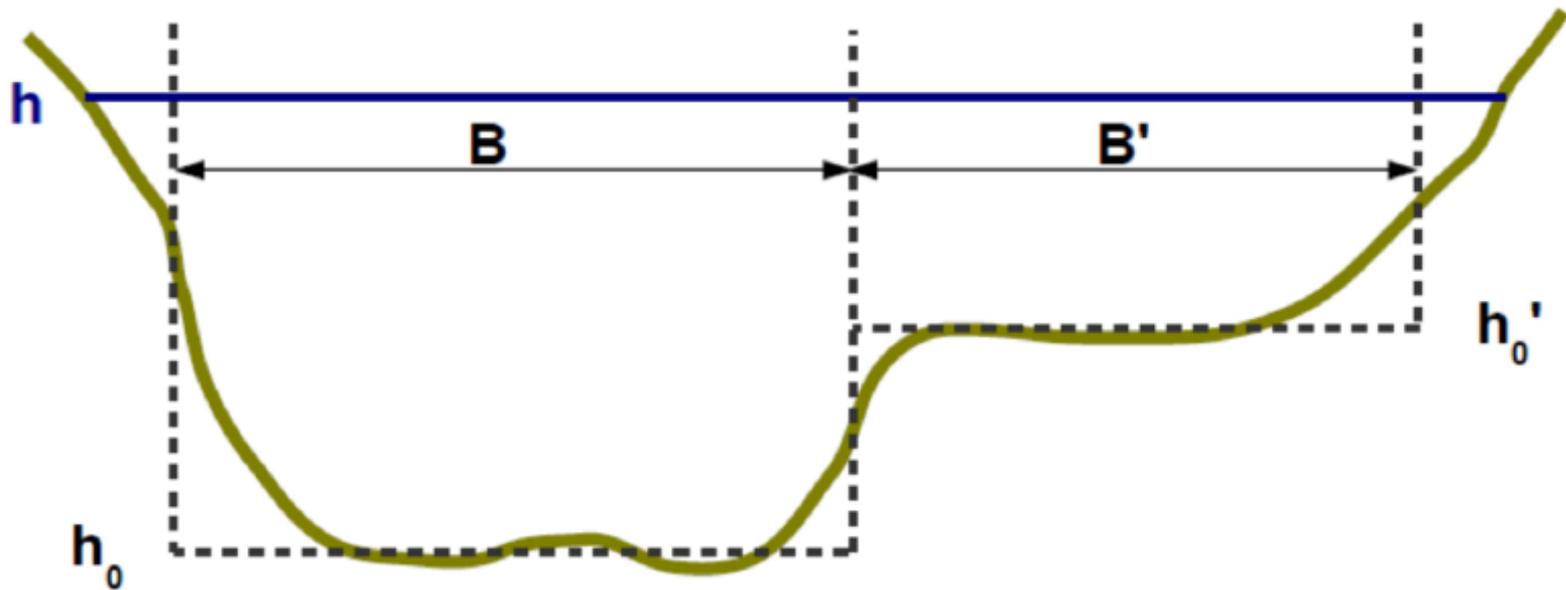


Waimakariri, Nueva Zelanda

# Aproximaciones de los controles naturales

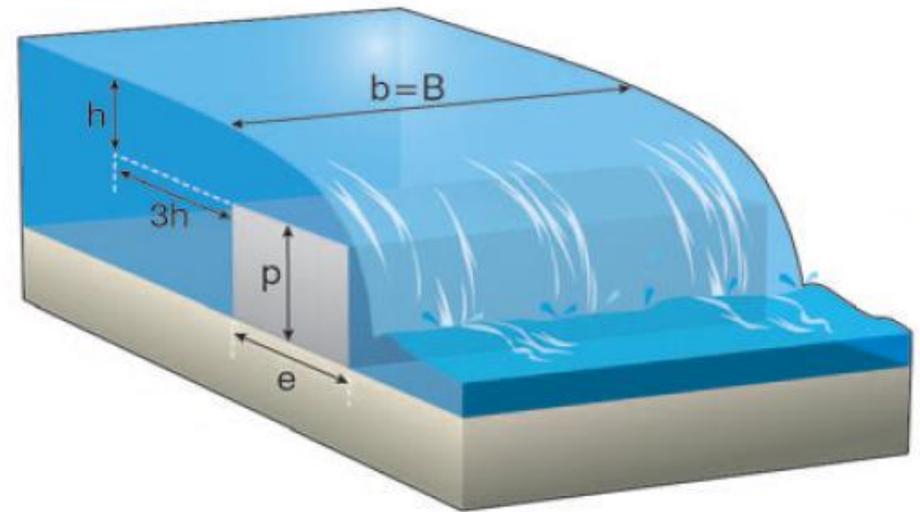
Aproximación de un lecho compuesto por dos canales rectangulares

- *Atención! La geometría de un control tipo canal es un promedio sobre el tramo que se extiende aguas abajo y aguas arriba de la estación.*



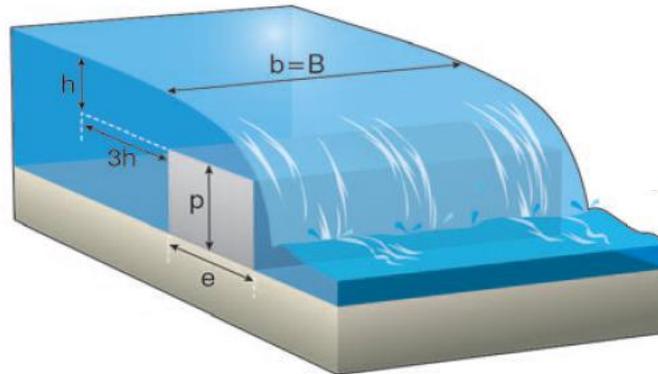
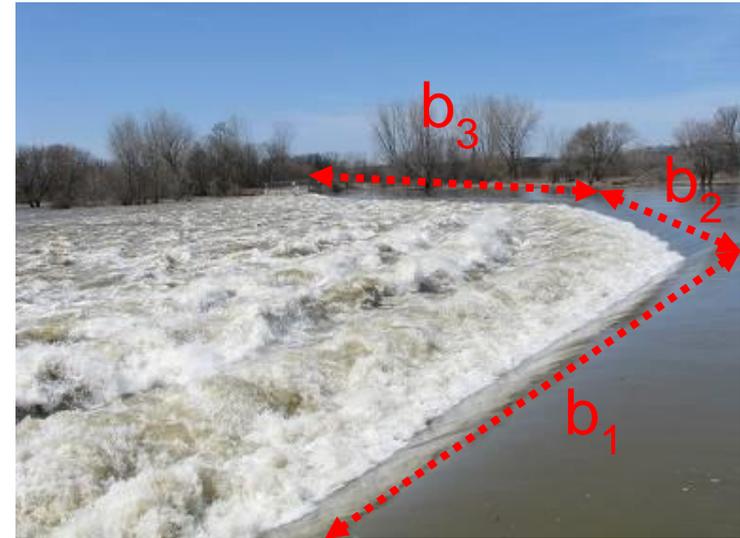
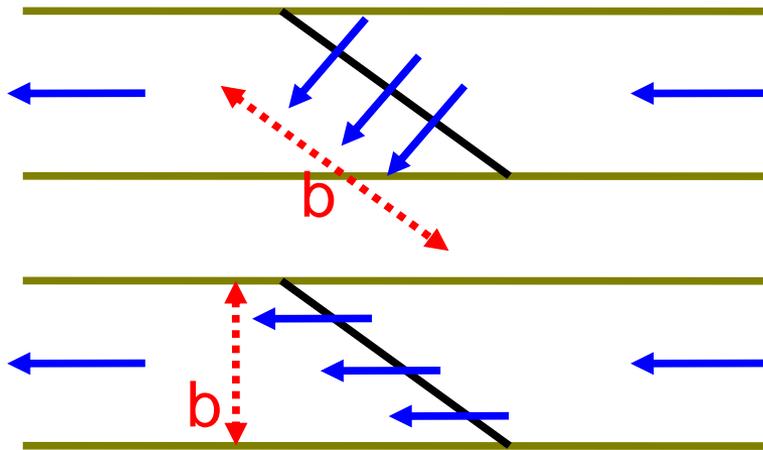
# Aproximaciones de los controles naturales

Un control tipo sección es modelizado por un vertedero (espeso o delgado) regular equivalente



# Aproximaciones de los controles naturales

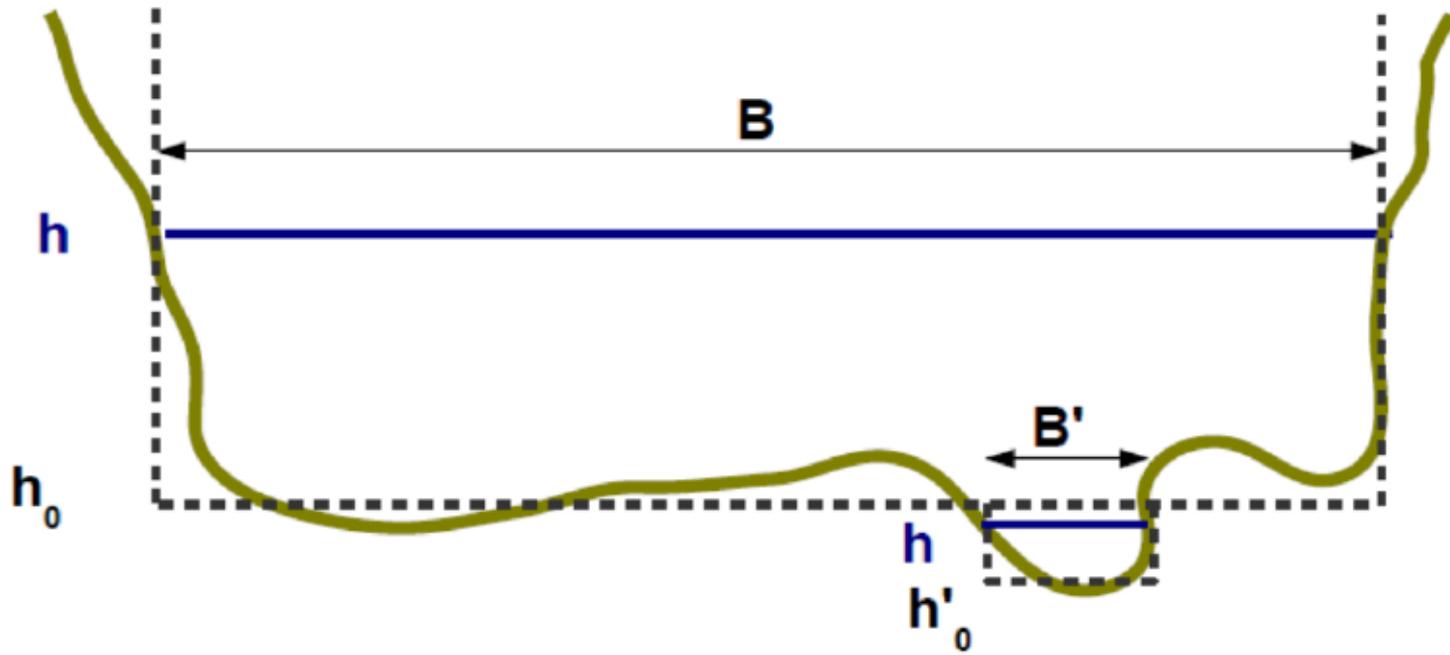
- *Atención! El ancho del vertedero es medido perpendicularmente a la dirección del flujo.*



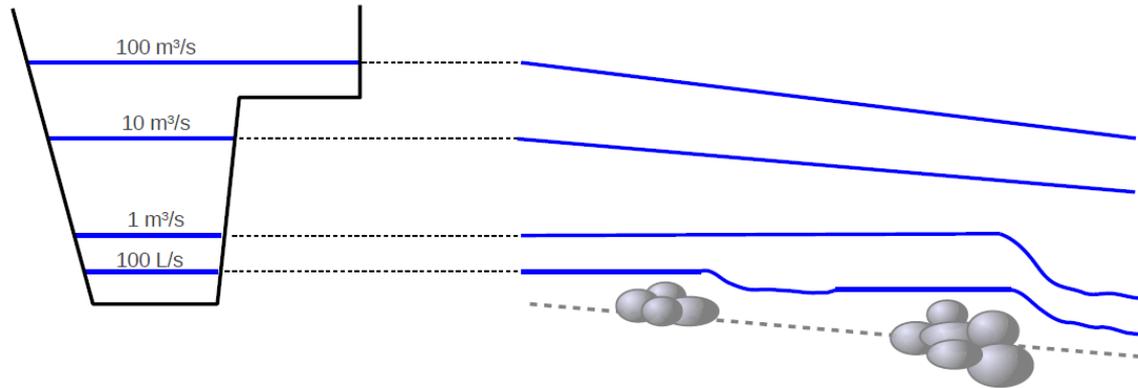
$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

# Aproximaciones de los controles naturales

- Aproximación de una sección crítica compleja (umbral) por dos vertederos rectangulares encajados.



# Y ahora, qué es lo que hago?...



$$Q(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h < k_1 \\ a_1(h - b_1)^{c_1} & \text{si } k_1 \leq h < k_2 \\ a_2(h - b_2)^{c_2} & \text{si } k_2 \leq h < k_3 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} & \text{si } k_3 \leq h < k_4 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} + a_4(h - b_4)^{c_4} & \text{si } k_4 \leq h \end{cases}$$

Calcular :  
3 parámetros  
por control

Ahora tenemos la ecuación de la curva de gasto...

... Se necesita calcular los parámetros  $k_i, a_i, c_i$  (los  $b_i$  sont deducidos por continuidad)

# La magia de la inferencia bayesiana

*Ahora debemos invocar al espíritu de Révérend Thomas Bayes (1702-1761)*



*Además de cualquier otro poder espiritual a mano...*



Imagen del Dios Huiracocha en la Puerta del Sol de Tiawanaco (Bolivia)

# La magia de la inferencia bayesiana



*El teorema de Bayes permite calcular la distribución “a posteriori” de los parámetros de la curva de gasto.*

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta})}{p(\mathbf{y})}$$

a posteriori

Verosimilitud

a priori

constante de normalización

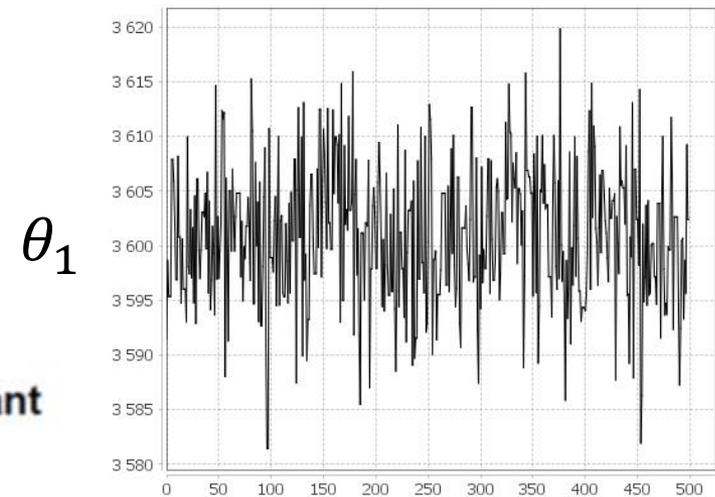
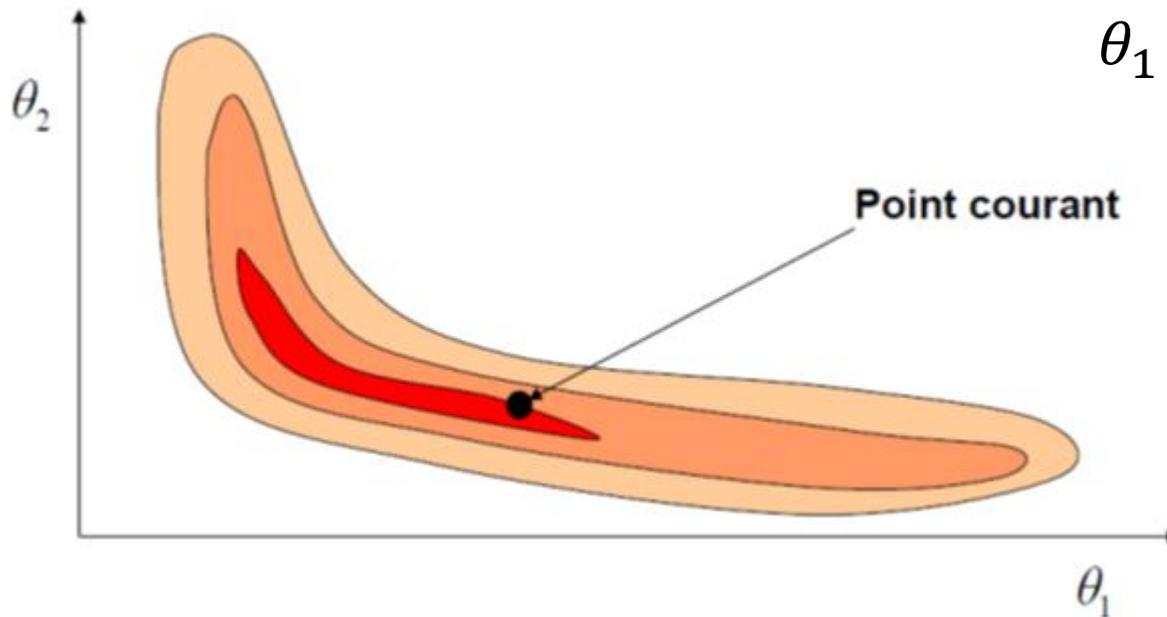
$\mathbf{y}$  : observaciones  
(parejas altura –  
caudal: los aforos)

$\boldsymbol{\theta}$  : parámetros de la  
curva de gasto

# La magia de la inferencia bayesiana



*La distribución a posteriori es muestreada por medio de simulaciones via el método de Cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC, algoritmo de Metrópolis)*



iteraciones

# La magia de la inferencia bayesiana

Ejemplo de un vertedero horizontal :  $Q(h) = a(h - b)^c$

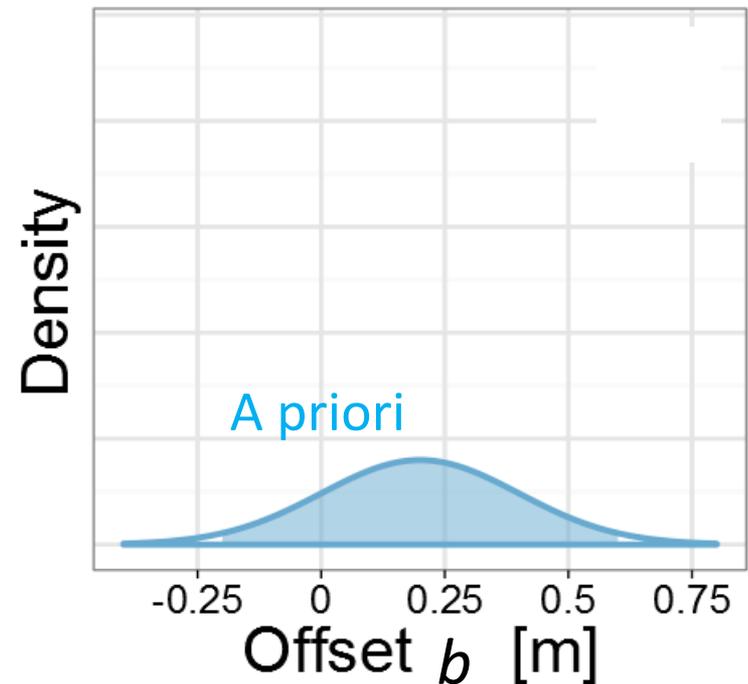


L'Altier en Goulette, Francia (EDF-DTG)

# La magia de la inferencia bayesiana

Conocimientos a priori :

$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$



# La magia de la inferencia bayesiana

Conocimientos a priori :

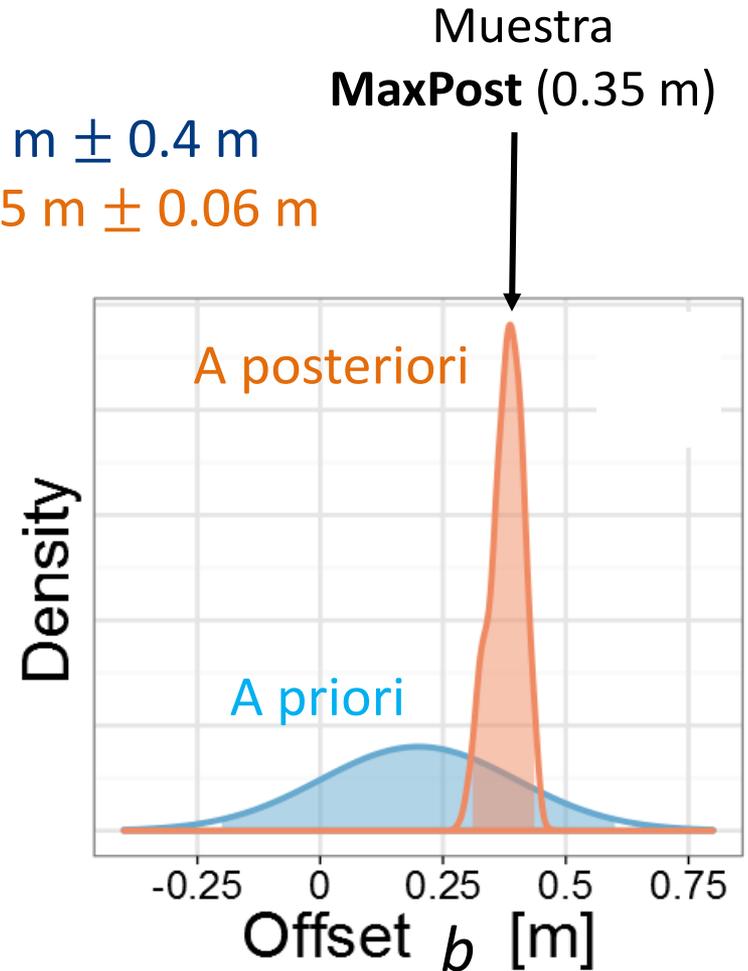
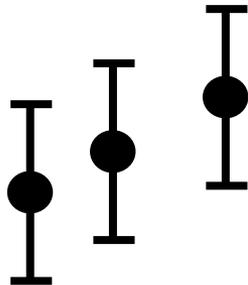
$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$

A posteriori :

$$b = 0.35 \text{ m} \pm 0.06 \text{ m}$$



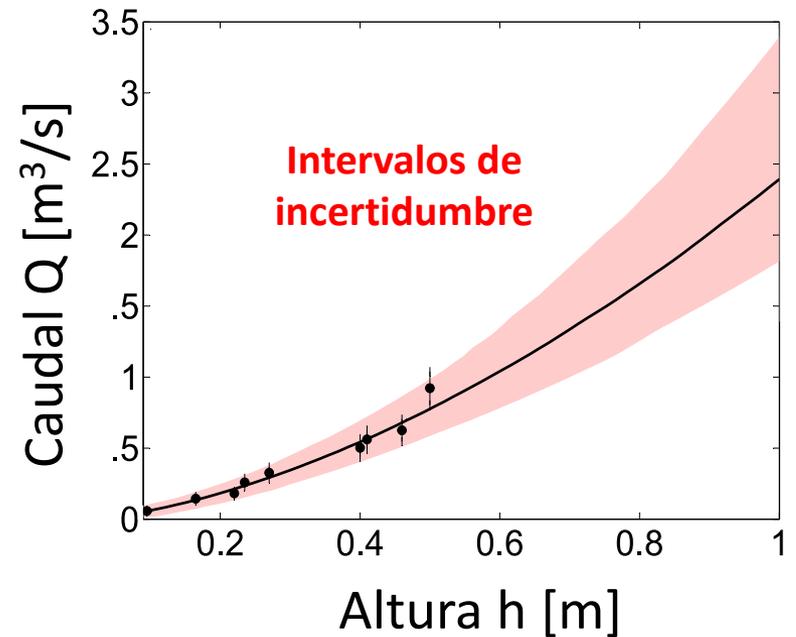
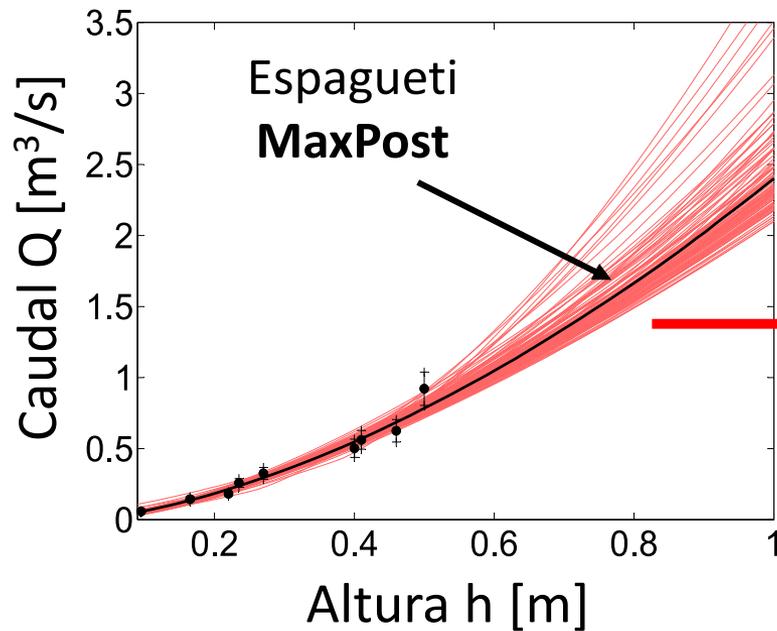
Observaciones (aforos) :



# Enfoque “espaguetis”



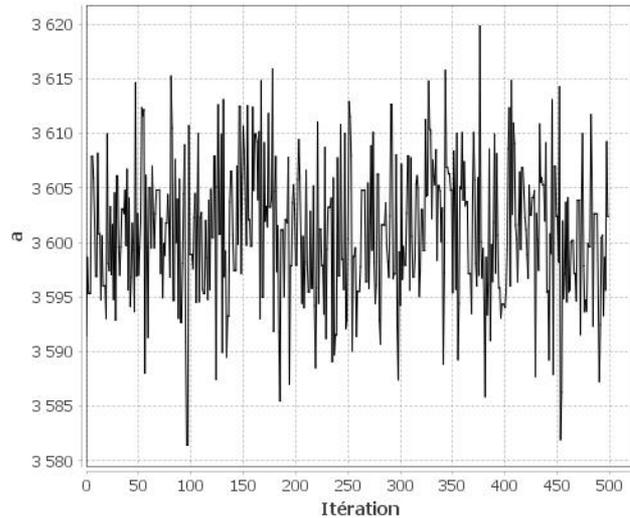
La distribución a posteriori es muestreada por la técnica MCMC.



Para más detalles: cf. ayuda de programa y las policopias del curso sobre incertidumbres.

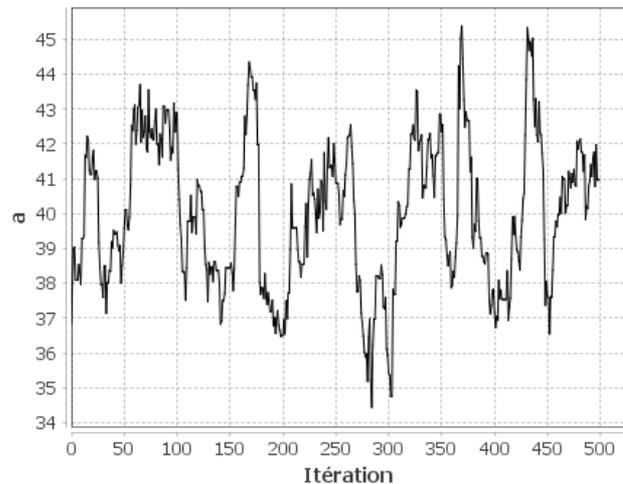
# Recordar en la práctica: verificar los trazados del método MCMC

a - Contrôle 1



Bueno!  
(garabato estacionario)

a - Contrôle 1



No muy bueno...  
(tendencias marcadas)

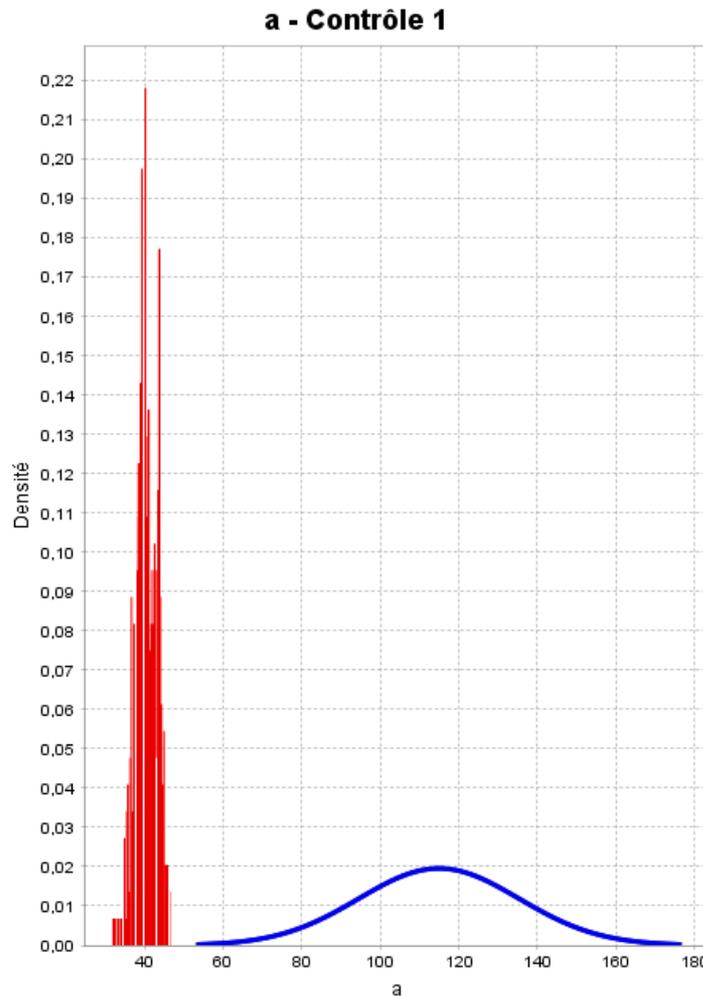
Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el **a priori** y el **a posteriori**



Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el **a priori** y el **a posteriori**

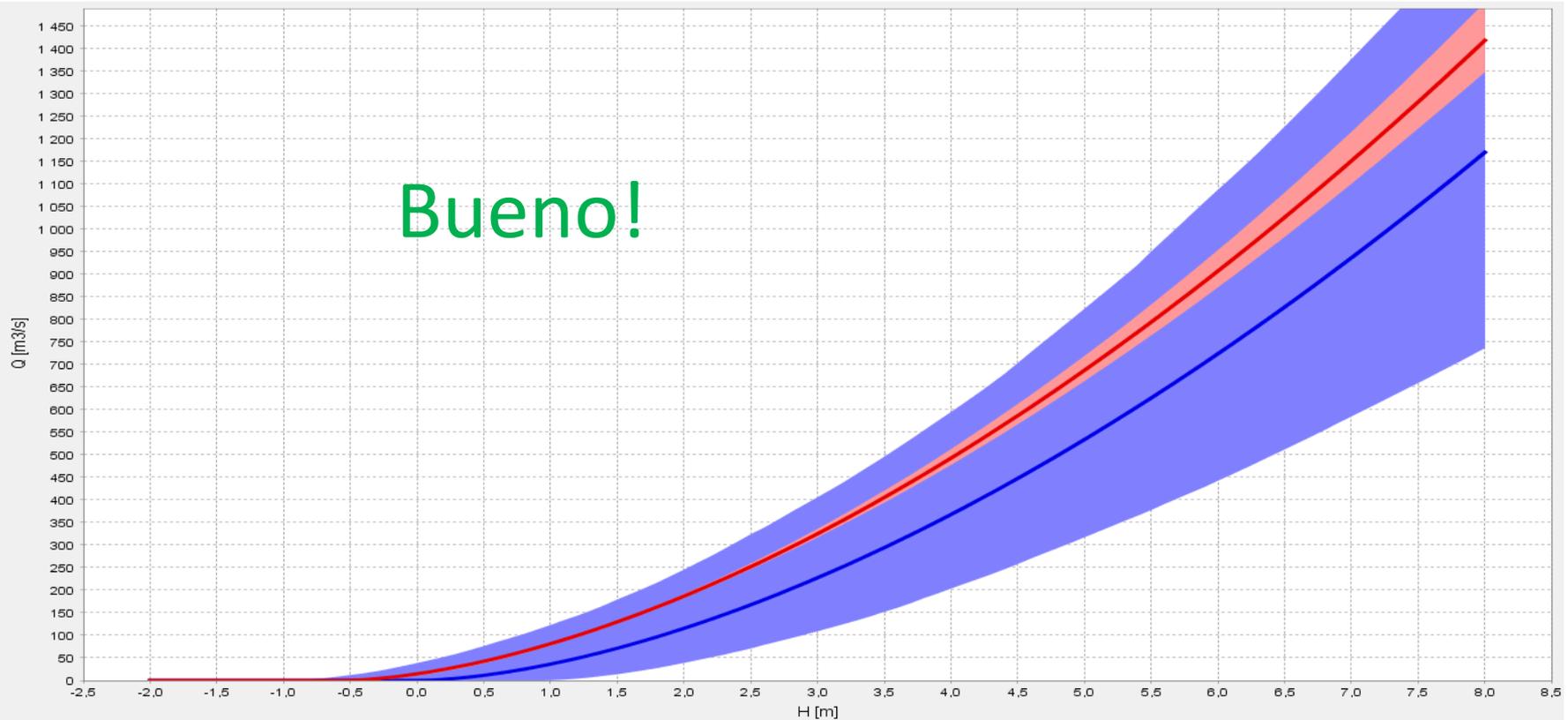


No es  
bueno!

Recordar en la práctica:

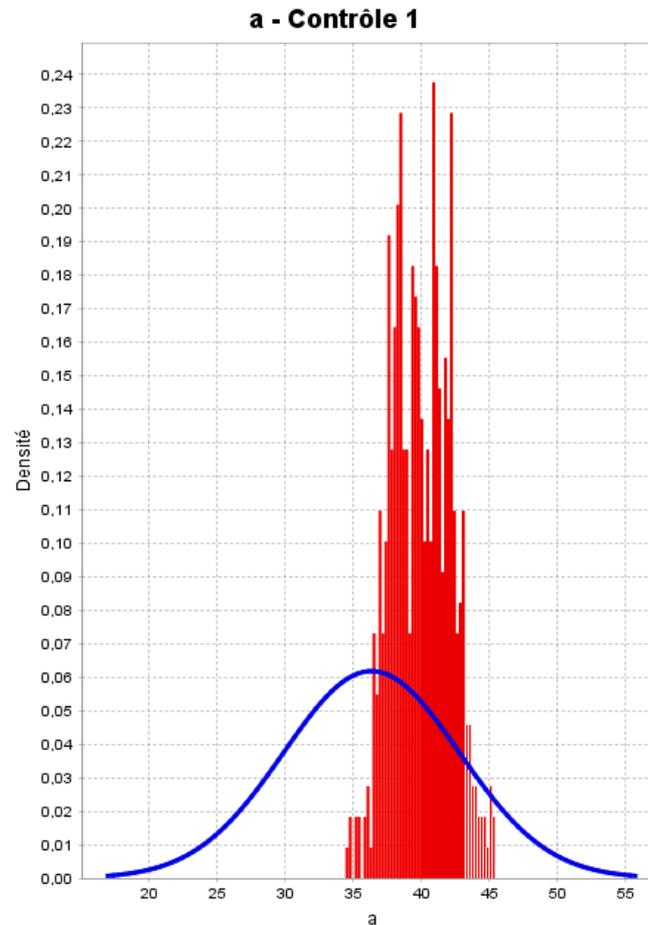
Verificar la ausencia de conflicto entre el **a priori** y el **a posteriori**

Bueno!



Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el **a priori** y el **a posteriori**



Bueno!

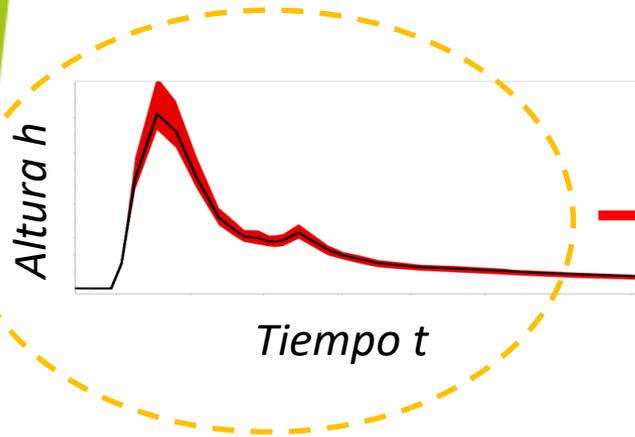
## Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el a priori y el a posteriori

En caso de conflicto:

- ✓ Verificar que los cálculos sean correctos (convergencia de las iteraciones MCMC)
- ✓ Verificar los valores de los a priori (no calibrarlos por medio de los resultados o las mediciones utilizadas!)
- ✓ Volver a ver las hipótesis de los controles hidráulicos, poner a prueba otras configuraciones hidráulicas.
- ✓ Verificar los aforos y sus incertidumbres (atención: se suponen que los errores de los diferentes aforos son independientes)

# Producir series hidrométricas *probabilísticas*



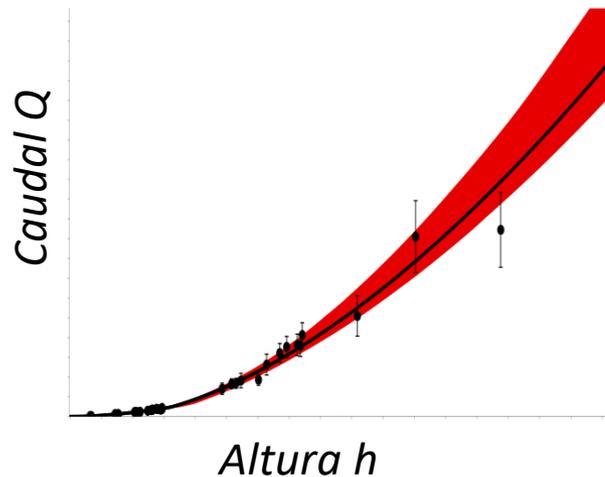
Limnigramma

$h(t)$

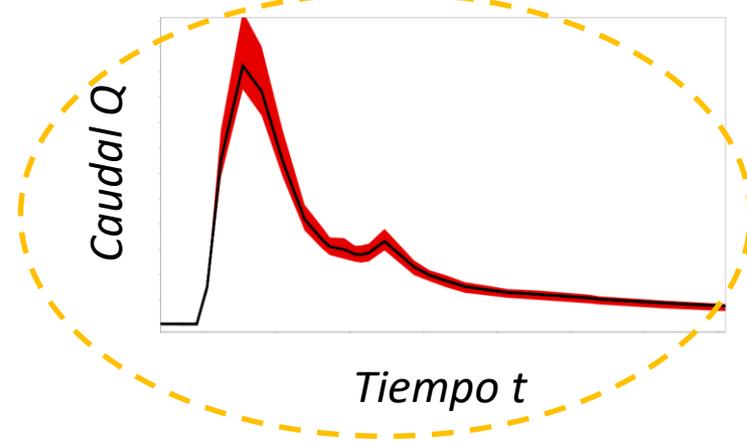
Aforos  
( $Q_i, h_i$ )



Curva de gasto  
 $Q(h)$



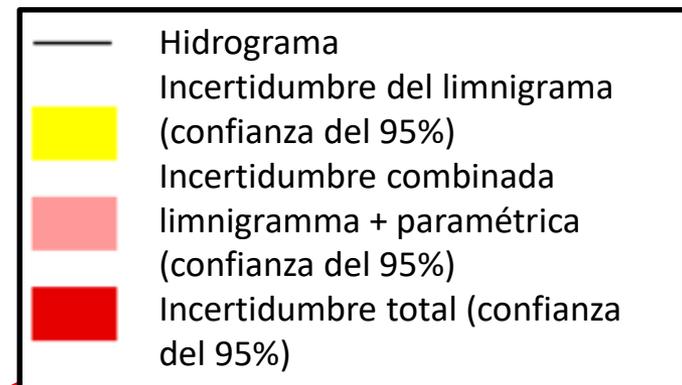
Hidrograma  
 $Q(t)$



# Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.

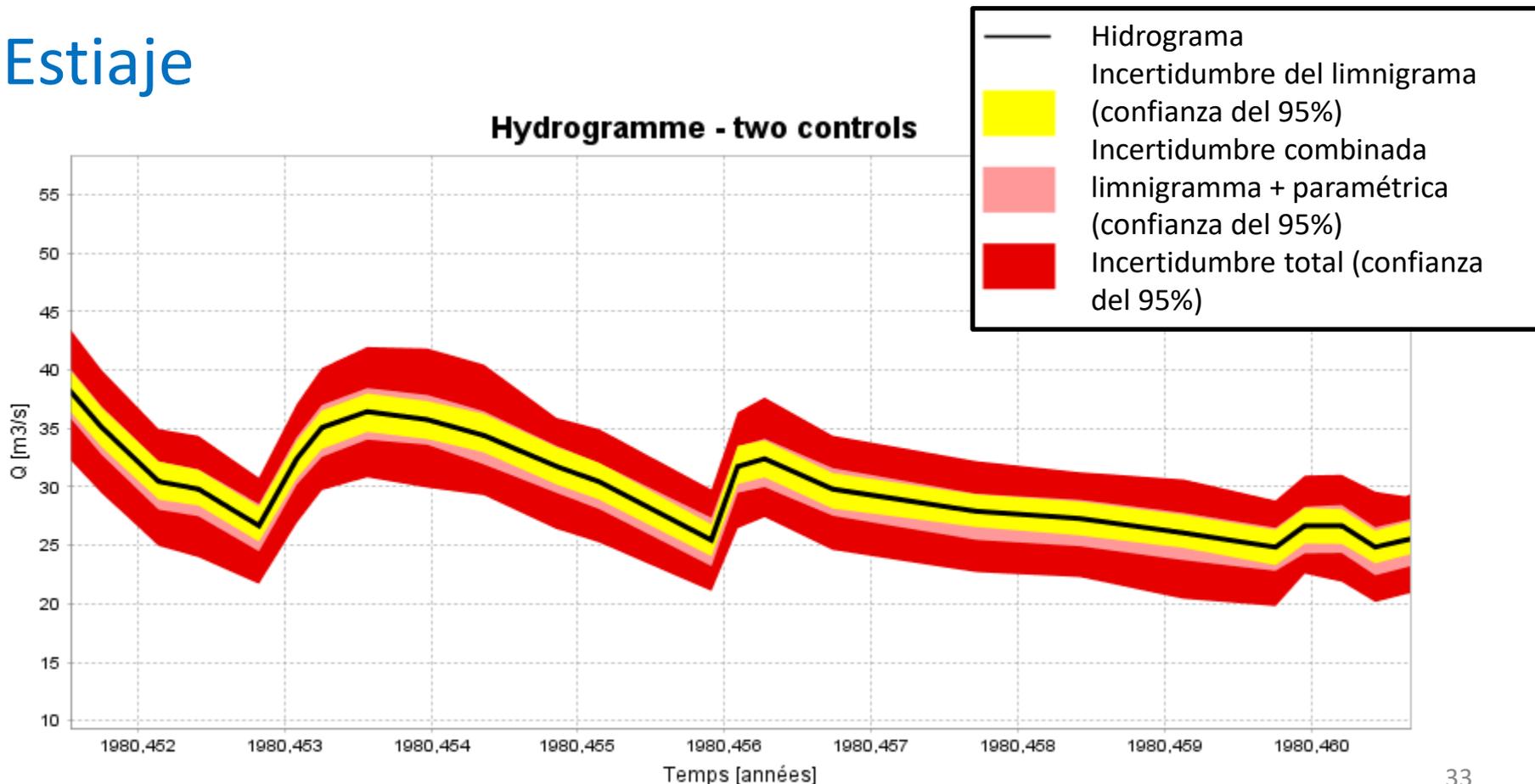
- ✓ Reducir la incertidumbre del limnómetro
- ✓ Mas aforos, con menos incertidumbre
- ✓ Aprioris mas precisos de los parámetros
- ✓ Utilizar un modelo de curva de gasto más adecuado (controles, cambios en el lecho, histéresis, influencia agua abajo...)



# Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.

## Estiaje

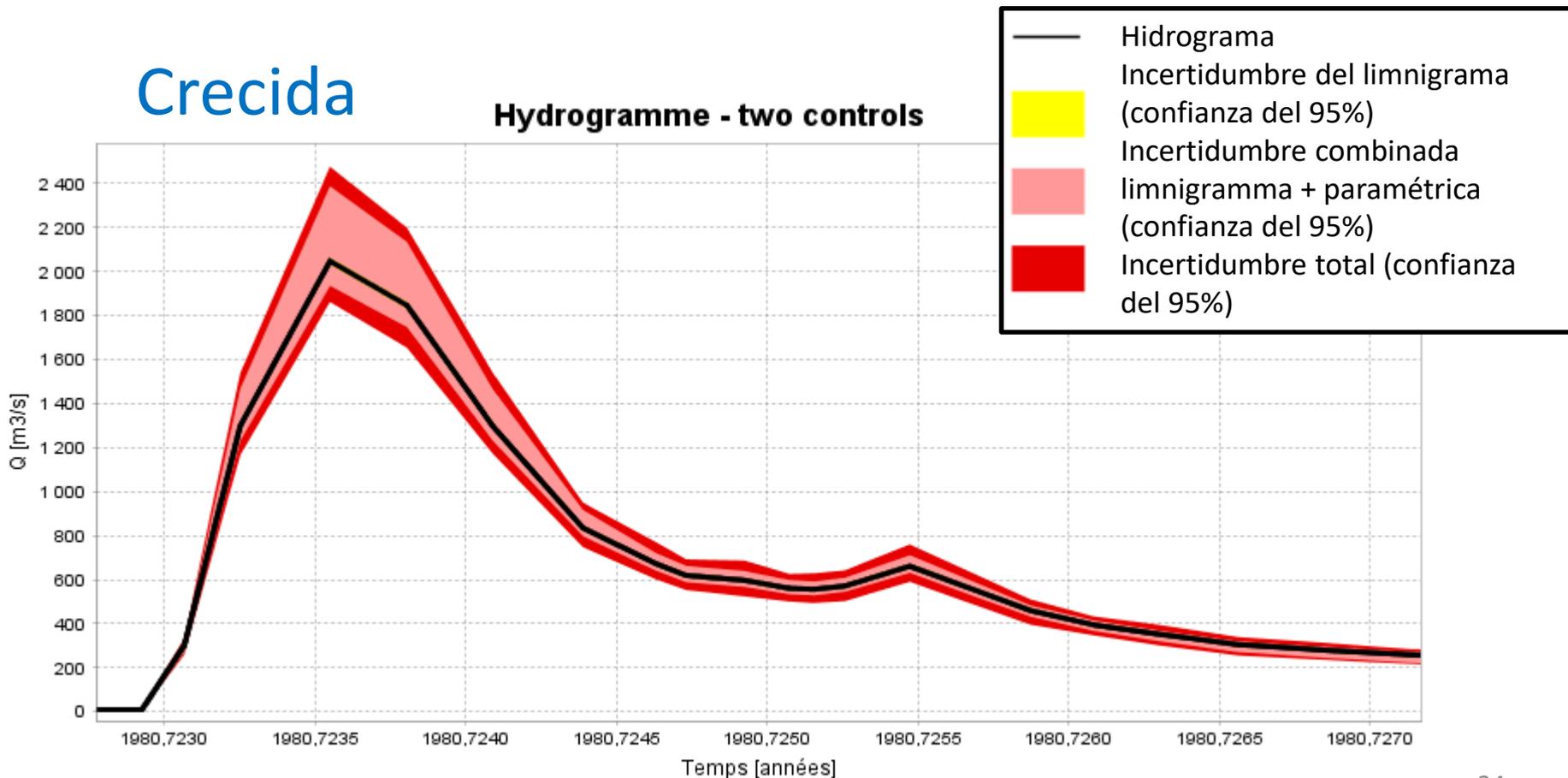


# Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.

## Crecida

### Hydrogramme - two controls



# Software BaRatinAGE

- Interface gráfica (java) y manual de usuario
- Version en francés, inglés, español y otros idiomas



BaRatinAGE

Archivo Configuración hidráulica Aforos Limnigrama Curva de gasto Hidrograma Opciones Ayuda

Explorador

- Catálogos
  - Configuración hidráulica
    - seuil récent
  - Aforos
    - 2014-2018
  - Error remanente
    - Lineal:  $\sigma = g_1 + g_2 * Q$
    - Constante:  $\sigma = g_1$
  - Limnigrama
    - 2014-2017
    - 2014
- Curva de gasto
  - 2014-2018
- Hidrograma
  - 2014-2017
  - 2014

Nombre: 2014-2018

Descripción:

Configuración hidráulica: seuil récent

Aforos: 2014-2018

Error remanente: Lineal:  $\sigma = g_1 + g_2 * Q$

Curva de gasto a posteriori

Hmin: 0.0 Hmax: 1.0 Nstep: 101 Hstep: 0.01

Ejecutar

Ylog: off Gráfico externo Leyenda Otros gráficos

Curva de gasto a posteriori - 2014-2018

H [m]	Q [m3/s]
0.00	0.00
0.05	0.01
0.10	0.02
0.15	0.04
0.20	0.07
0.25	0.12
0.30	0.18
0.35	0.28
0.40	0.42
0.45	0.65
0.50	1.00
0.55	1.40
0.60	1.80

Aplicar

# Software BaRatinAGE

- Licencia individual gratuita, escribir a [baratin.dev@lists.irstea.fr](mailto:baratin.dev@lists.irstea.fr)
- Lista de usuarios (~190 suscriptores con licencia)
- Uso operativo (servicios hidro en Francia, CNR, NEON-USA, INA Argentina)
- Uso por parte de investigadores :



Journal of Hydrology 597 (2021) 126160  
 Contents lists available at ScienceDirect  
 Journal of Hydrology  
 journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Research papers  
 Combining a segmentation procedure and the BaRatin stationary estimate nonstationary rating curves and the associated uncertainty



**AGU PUBLICATIONS**  
**Water Resources Research**  
 RESEARCH ARTICLE High-Elevation Evapotranspiration Using Streamflow and NASA Airborne Observations to Close the Upper Balance  
 10.1002/2017WR020473  
 Key Points:  
 • Distributed streamflow and lidar-based SWE observations are used to close alpine basins' water

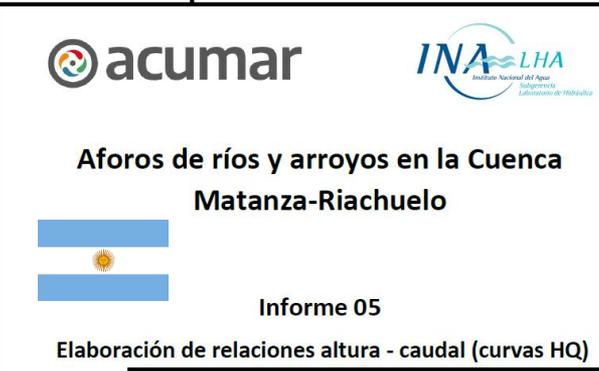


Earth Syst. Sci. Data, 10, 1063-1074, 2018  
 https://doi.org/10.5194/essd-10-1063-2018  
 © Author(s) 2018. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.



**Water and sediment fluxes in Mediterranean mountainous regions: comprehensive assessment**  
 World Environmental and Water Resources Congress 2016

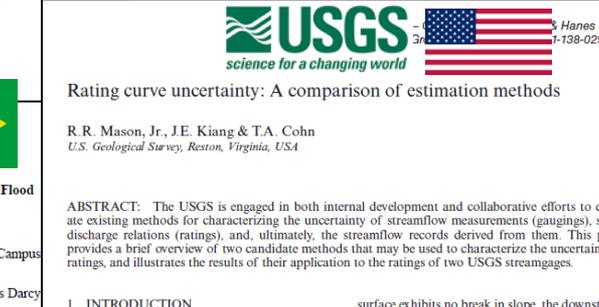
**A Bayesian Approach for the Evaluation of Rating Curve Uncertainties in Flood Frequency Analyses**  
 A. L. N. A. Osorio<sup>1</sup> and D. S. Reis Jr., Ph.D.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Campus Darcy Ribeiro, Brasilia 70.910-900. E-mail: [osorio.analisa@gmail.com](mailto:osorio.analisa@gmail.com)  
<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Campus Darcy Ribeiro, Brasilia 70.910-900. E-mail: [dircureis@unb.br](mailto:dircureis@unb.br)



**acumar** **INA LHA**  
**Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo**  
**Informe 05**  
 Elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)



Advances in Water Resources 105 (2017) 51–66  
 Contents lists available at ScienceDirect  
 Advances in Water Resources  
 journal homepage: [www.elsevier.com/locate/adwres](http://www.elsevier.com/locate/adwres)  
 Original Article  
 Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges



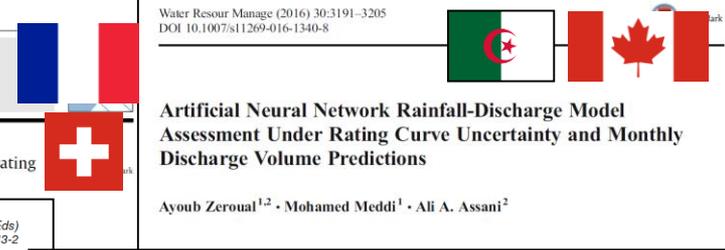
**USGS** science for a changing world  
**Rating curve uncertainty: A comparison of estimation methods**  
 R.R. Mason, Jr., J.E. Kiang & T.A. Cohn  
 U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA  
 ABSTRACT: The USGS is engaged in both internal development and collaborative efforts to evaluate existing methods for characterizing the uncertainty of streamflow measurements (gaugings), stage-discharge relations (ratings), and, ultimately, the streamflow records derived from them. This paper provides a brief overview of two candidate methods that may be used to characterize the uncertainty of ratings, and illustrates the results of their application to the ratings of two USGS streamgages.  
 1 INTRODUCTION  
 surface exhibits no break in slope, the downstream



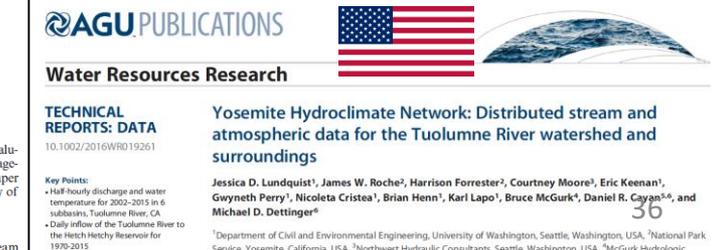
**Bayesian Rating Curve Modeling: Alternative Error Model to Improve Low-Flow Uncertainty Estimation**  
 Rodrigo Garcia<sup>1</sup>; Veber Costa, Ph.D.<sup>2</sup>; and Francisco Silva, Ph.D.<sup>3</sup>



**AGU PUBLICATIONS**  
**Water Resources Research**  
 ARTICLE The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting  
 20225  
 David Ociol<sup>1</sup>, Nataliya Le Vine<sup>1</sup>, Ida Westerberg<sup>2</sup>, Florian Pappenberger<sup>3,4</sup>, and Wouter Buytaert<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK, <sup>2</sup>Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden, <sup>3</sup>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK, <sup>4</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA

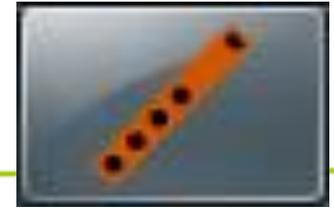


**Water Resour. Manage.** (2016) 30:3191–3205  
 DOI 10.1007/s11269-016-1340-8  
**Artificial Neural Network Rainfall-Discharge Model Assessment Under Rating Curve Uncertainty and Monthly Discharge Volume Predictions**  
 Ayoub Zeroual<sup>1,2</sup> · Mohamed Meddi<sup>1</sup> · Ali A. Assani<sup>2</sup>



**AGU PUBLICATIONS**  
**Water Resources Research**  
 TECHNICAL REPORTS: DATA  
 10.1002/2016WR019261  
**Yosemite Hydroclimate Network: Distributed stream and atmospheric data for the Tuolumne River watershed and surroundings**  
 Jessica D. Lundquist<sup>1</sup>, James W. Roche<sup>2</sup>, Harrison Forrester<sup>2</sup>, Courtney Moore<sup>3</sup>, Eric Keenan<sup>4</sup>, Gwyneth Perry<sup>5</sup>, Nicoleta Cristea<sup>1</sup>, Brian Henn<sup>1</sup>, Karl Lapo<sup>1</sup>, Bruce McGurk<sup>6</sup>, Daniel R. Cayan<sup>5,6</sup>, and Michael D. Dettinger<sup>6</sup>  
<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, USA, <sup>2</sup>National Park Service, Yosemite, California, USA, <sup>3</sup>Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA, <sup>4</sup>McGurk Hydrologic, Seattle, Washington, USA, <sup>5</sup>Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Washington, Seattle, Washington, USA, <sup>6</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, USA  
 Key Points:  
 • Half-hourly discharge and water temperature for 2002–2015 in 6 subbasins, Tuolumne River, CA  
 • Daily inflow of the Tuolumne River to the Hetch-Hetchy Reservoir for 1990–2015  
 • Meteorological and snow data are available for the entire watershed

# Conclusiones sobre el método BaRatin



- ✓ *BaRatin / BaRatinAGE* para las curvas de gasto simples
  - La evaluación de incertidumbres ayuda a mejorar el procedimiento de medición.
  - Registra el máximo de información, de fotos y de explicaciones sobre sus *baratinages*
  - Consultar la documentación y las fichas prácticas
  - Cualquier pregunta o duda, escribir a: [baratin.dev@lists.irstea.fr](mailto:baratin.dev@lists.irstea.fr)
- ✓ *BaM!* para las curvas de gastos simples y complejas
  - Desarrollo de una interface gráfica
  - Cambios en el lecho, histéresis (bucles cuando hay crecidas), vegetación acuática, doble escala, influencia de la marea...
  - Aplicación en tiempo real: detección de cambios en el lecho



# TP6 – El Mercier

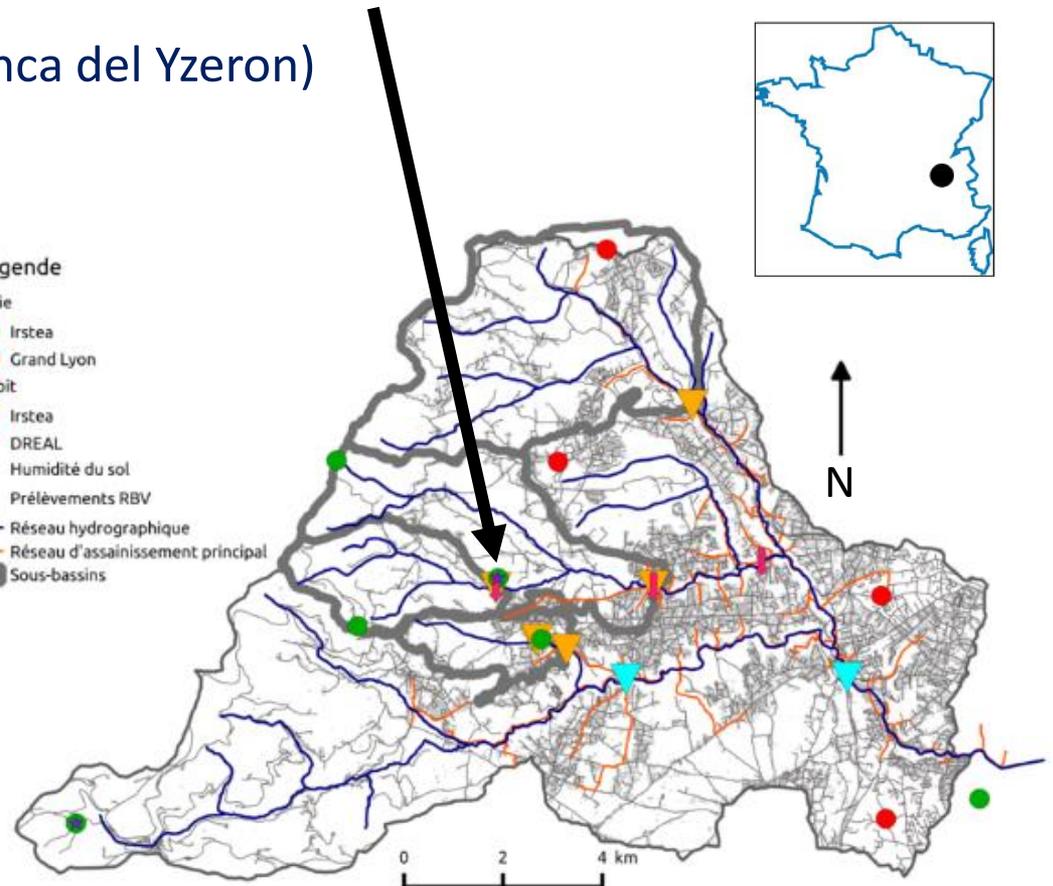
- Estación « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Seguimiento hidrométrico de la cuenca hidrográfica del Yzeron (oeste de Lyon, Francia) desde 1997
- Estación INRAE  
(Observatorio OTHU – sitio cuenca del Yzeron)

<https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>



## Légende

- Pluie
  - Irstea
  - Grand Lyon
- Débit
  - ▼ Irstea
  - ▼ DREAL
- Humidité du sol
  - ★
- Prélèvements RBV
  - ↓
- Réseau hydrographique
  -
- Réseau d'assainissement principal
  -
- Sous-bassins
  -



# TP6 – El Mercier

- Estación « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Seguimiento hidrométrico de la cuenca hidrográfica del Yzeron (oeste de Lyon, Francia) desde 1997, estación INRAE, (Observatorio OTHU – sitio cuenca del Yzeron)



Identifiquen y describan los controles hidráulicos

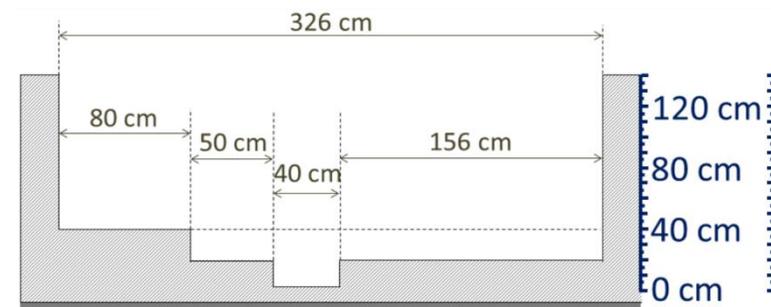
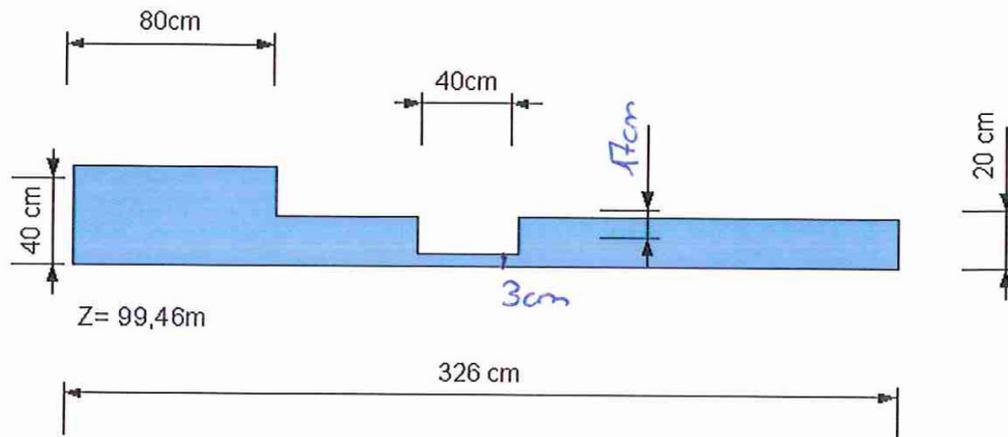
Resuma el modelo de curva de gasto que se desea estimar

# TP6 – El Mercier

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos:

- Determinar los anchos et las cotas de los vertederos

Diseño de la estructura (2014)



El cero de la escala limnimétrica está calibrada en la parte inferior del macizo de la sección en concreto.

# TP6 – El Mercier

- Establecer la configuración hidráulica
- Cuáles son las incertidumbre de los aforos?
- Calcular la curva de gasto 2014-2018
- Verificar que las simulaciones MCMC estén bien, así como el acuerdo entre el a priori y el a posteriori
- Cuál es la incertidumbre supuesta para el limnograma?
- Calcular el hidrograma 2014
- Cuál es la componente de incertidumbre dominante en la crecida? y en el estiaje?

Controles	Alturas de activación (k) en m	Ancho de los vertederos (B) en m	Exponentes (c)
Vertedero rectangular (Control 1)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Vertedero rectangular (Control 2)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Vertedero rectangular (Control 3)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??

# TP6 – El Mercier

- Establecer la configuración hidráulica
- Cuáles son las incertidumbre de los aforos?
- Calcular la curva de gasto 2014-2018
- Verificar que las simulaciones MCMC estén bien, así como el acuerdo entre el a priori y el a posteriori
- Cuál es la incertidumbre supuesta para el limnigrama?
- Calcular el hidrograma 2014
- Cuál es la componente de incertidumbre dominante en la crecida? y en el estiaje?

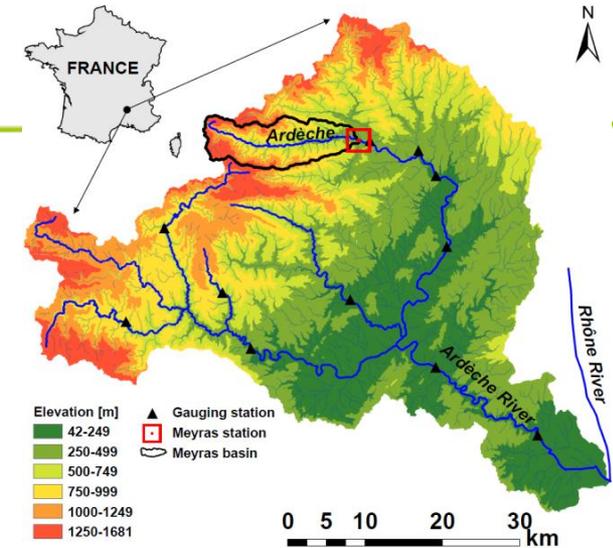
Controles	Alturas de activación (k) en m	Ancho de los vertederos (B) en m	Exponentes (c)
Vertedero rectangular (Control 1)	$0.03 \pm 0.02$	$0.40 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.05$
Vertedero rectangular (Control 2)	$0.20 \pm 0.02$	$2.06 \pm 0.10$	$1.5 \pm 0.05$
Vertedero rectangular (Control 3)	$0.40 \pm 0.02$	$0.8 \pm 0.05$	$1.5 \pm 0.05$

# TP2 – Ardèche en Meyras

Estación de la red hidrométrica francesa (V5004030, SPC Grand-Delta)

Cuenca hidrográfica: 98 km<sup>2</sup>

Caudal medio: 3.69 m<sup>3</sup>/s



PÉRIODE DE RETOUR DE CRUE (en m<sup>3</sup>/s)

Période de retour de crue	Periodo de retorno de la crecida	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Débit instantané calculé	Caudal instantáneo calculado	150	240	290	350	420



# TP2 – Ardèche en Meyras

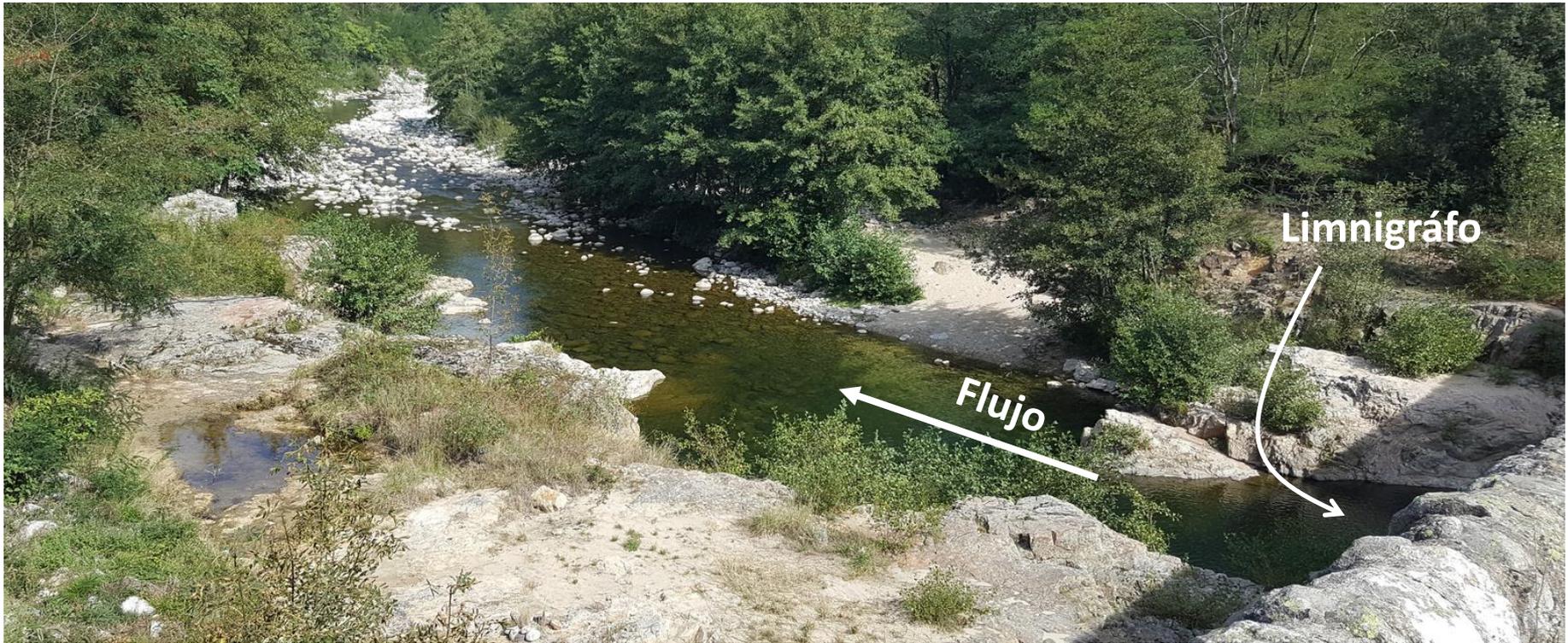
Identificación de los controles (tipo sección/  
tipo canal):

- En estiaje o bajos caudales?
- Caudales medios?
- Crecidas o altas aguas/ altos caudales?



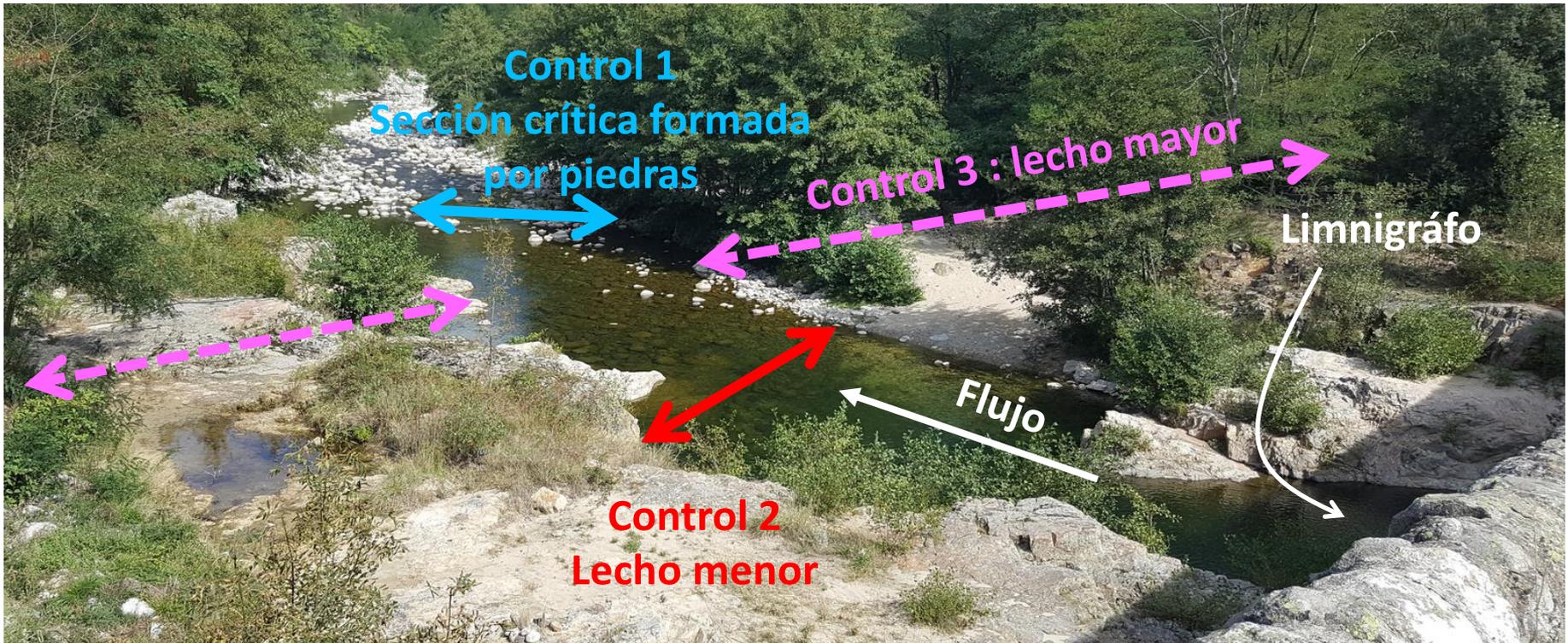
# TP2 – Ardèche en Meyras

Identificación de los controles (tipo sección/tipo canal):



# TP2 – Ardèche en Meyras

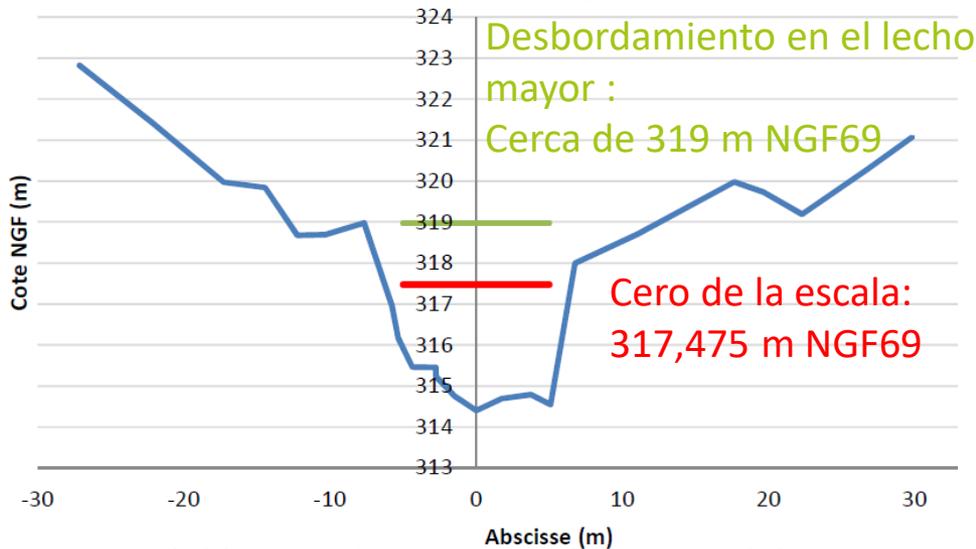
Identificación de los controles (tipo sección/tipo canal):



# TP2 – Ardèche en Meyras

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos

Perfil transversal alrededor de 14 m aguas abajo de la estación



La pendiente de la línea es aproximadamente estimada a 5 m/km

Lecho menor medianamente rugoso, lecho mayor con vegetación

Ancho y cota del la sección crítica de bajos caudales:

B1 = ?

k1 = ?

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **menor**:

B2 = ?

S2 = ?

K2 = ?

k2 = ?

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **mayor**:

B3 = ?

S3 = ?

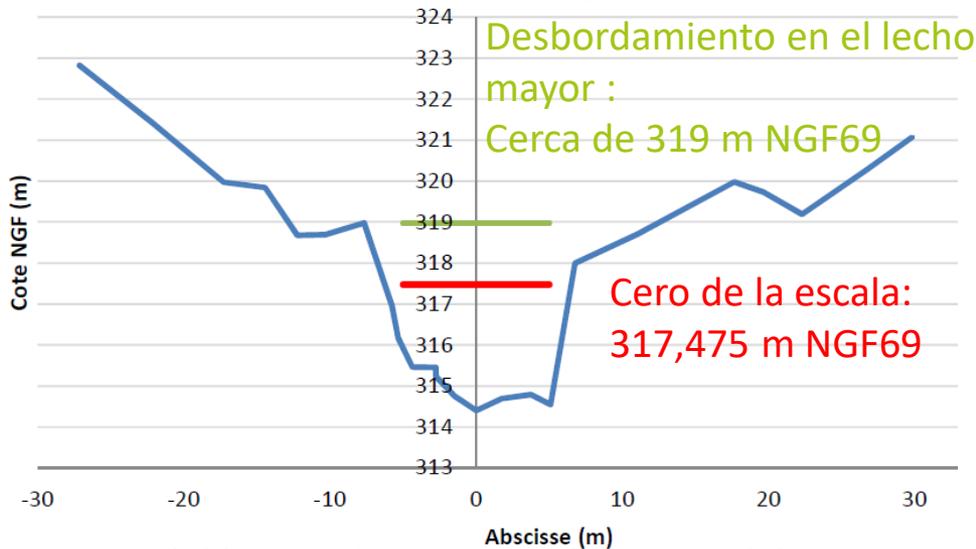
K3 = ?

k3 = ?

# TP2 – Ardèche en Meyras

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos

Perfil transversal alrededor de 14 m aguas abajo de la estación



La pendiente de la línea es aproximadamente estimada a 5 m/km

Lecho menor medianamente rugoso, lecho mayor con vegetación

Ancho y cota del la sección crítica de bajos caudales:

$$B1 = 8 \pm 4 \text{ m}$$

$$k1 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **menor**:

$$B2 = 15 \pm 5 \text{ m}$$

$$S2 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K2 = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k2 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **mayor**:

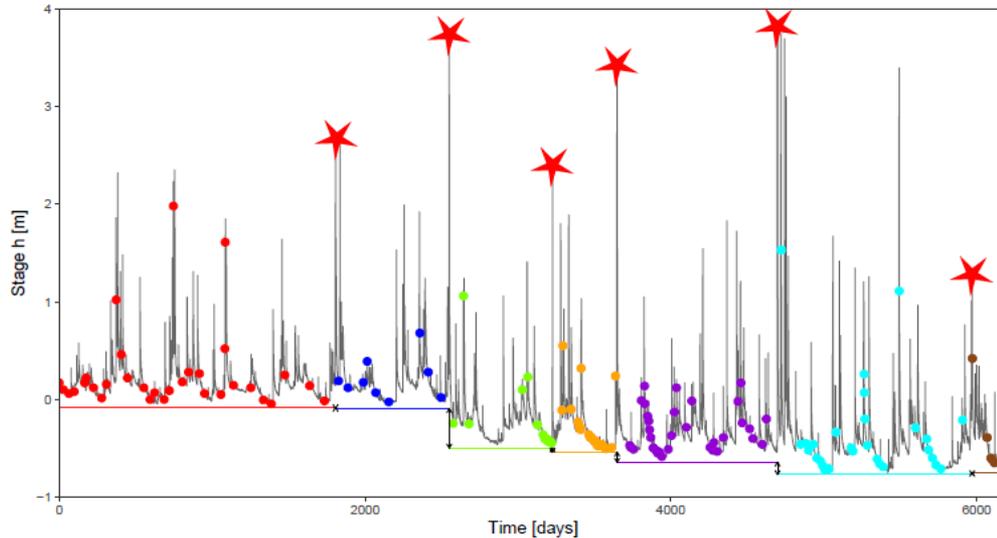
$$B3 = 30 \pm 10 \text{ m}$$

$$S3 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K3 = 15 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k3 = 1.2 \pm 0.5 \text{ m}$$

# TP2 – Ardèche en Meyras

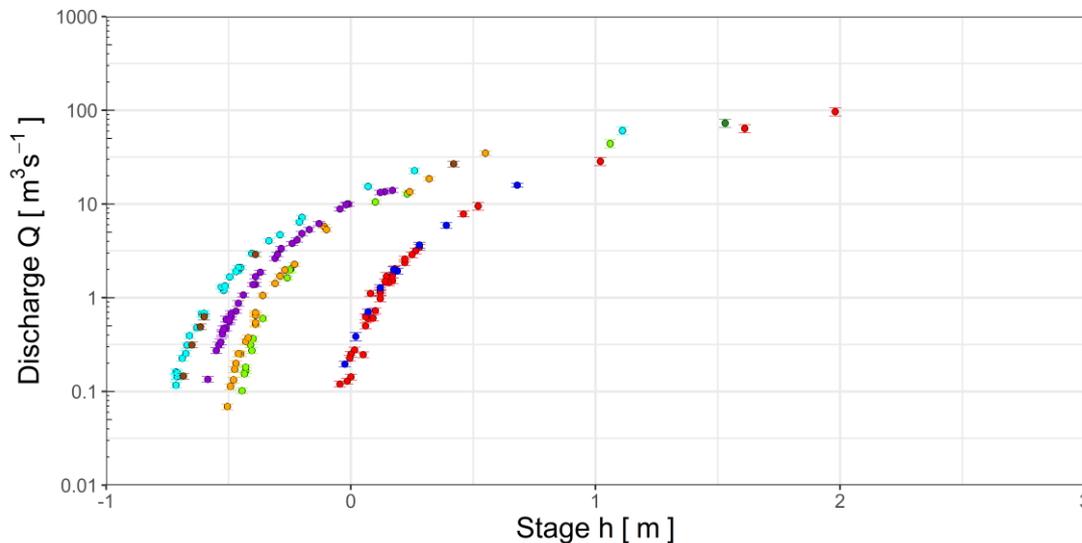


Cambios netos provocados por el hundimientos del lecho menor durante las crecidas:

- Visible en el limnigrama (altura-tiempo)
- Visible en los aforos (altura-caudal)

Cuál(es) parámetro(s) de la curva de gasto es(son) afectado(s)?

Qué se hace para poder manejar esto?



**Ardèche en Meyras (Francia),  
periodo 2001-2018**

Datos SPC Grand Delta