



**fcfm**

**Ingeniería Civil**  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**amtc**  
UNIVERSIDAD  
DE CHILE ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

# ¿Cuánta agua traerán nuestros ríos durante las próximas décadas?

**Pablo A. Mendoza**

Hidrólogo

Colaboradores: Nicolás Vásquez, Javier Cepeda, Tomás Gómez, Dimitri Dionizis, Eduardo Muñoz, Miguel Lagos, Camila Álvarez, Juan Pablo Boisier y Ximena Vargas



*Departamento de Ingeniería Civil  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Jueves 14 de mayo de 2020*

# Agenda

- Motivación.
- Conceptos.
- ¿Qué sabemos de la Hidrología en Chile?
- Actualización del Balance Hídrico Nacional.
- Cambios proyectados (2030-2060).
- Perspectivas finales.

# Motivación



"recursos hidricos" "cambio climático" chile



Todo Imágenes Noticias Vídeos Maps Más Preferencias Herramientas

Cerca de 634.000 resultados (0,39 segundos)

## Estudio el cambio climáti

<https://www.odepa.gob.cl> › publ

28 dic. 2016 - Estudio que contiene tendencias del clima y futuro del ca

## Plan de adaptación para

<https://mma.gob.cl> › plan-de-ad

El Plan de Adaptación al Cambio C etapa de generación de información

[PDF]

## Estudio El cambio climáti

<https://www.onia.cl> › articles-911

"water resources" "climate change" chile



Todo Imágenes Noticias Maps Vídeos Más Preferencias Herramientas

Cerca de 2.560.000 resultados (0,57 segundos)

## Artículos académicos para "water resources" "climate change" chile

... in **Chile**: Availability, management and **climate change** - Valdés-Pineda - Mencionado por 124

**Climate change** impacts on the hydrology of a ... - Vicuña - Mencionado por 174

... and implications for **water resources** in the region - Masiokas - Mencionado por 200

One of the main consequences of **climate change** for **Chile** will be a lack of water. Government estimates indicate a reduction in water availability nationwide of between 10% and 37% compared to 30 years ago. In some areas, it may have depleted by half. 11 jun. 2019



dialogochino.net › climate-energy › 27792-chiles-water... ▾

## Chile's water crisis stifles climate adaptation plans



# Motivación

Dry ← Precipitation → Wet



North

Atacama Desert

Altiplano



Central Valley



"Green" Patagonia

Patagonia



South

Dry Hot

Andes Cordillera (east)

Temperature  
Precipitation

Wet Cold

PET / P

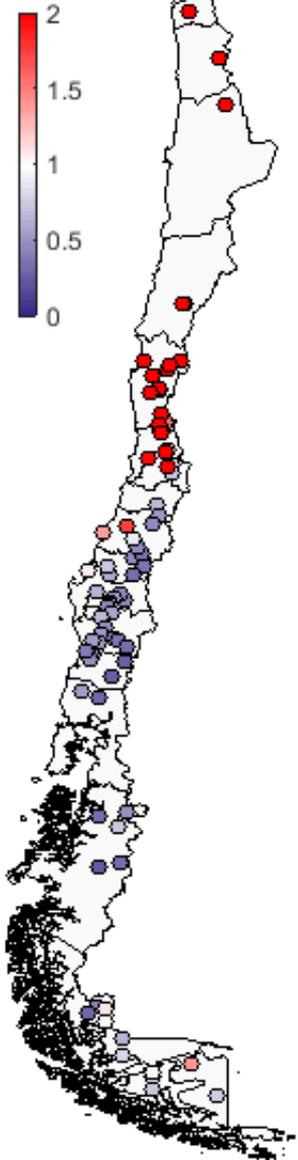
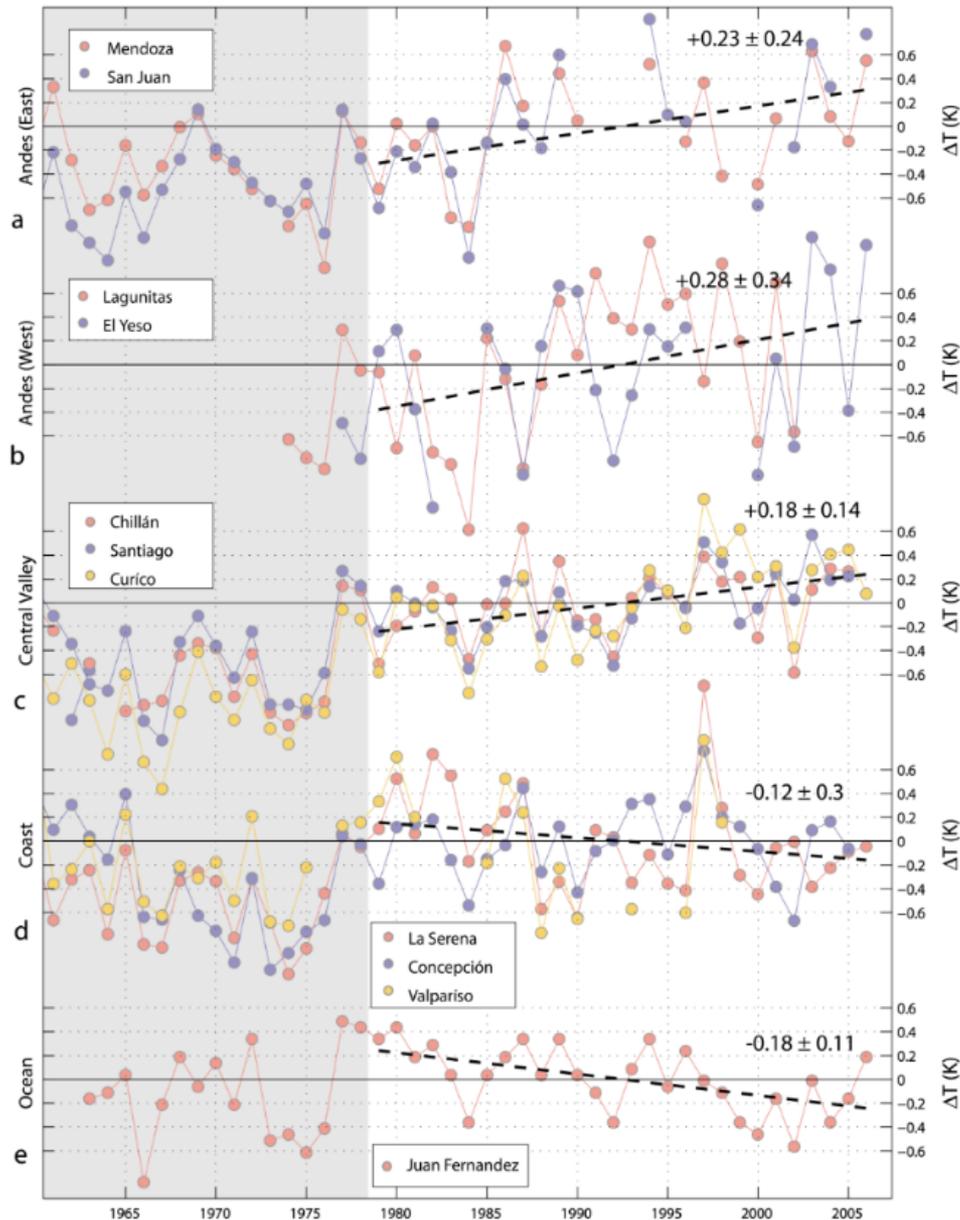


Fig. Nicolás Vásquez

# Motivación



## Tendencias hidroclimáticas en Chile

La tendencia de calentamiento es distinta en la costa, el valle y zonas montañosas.

Valle central y la zona occidental de los Andes: incremento aproximado de  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  por década.

Zonas costeras: disminución de las temperaturas.

**¿Cómo se proyectan estas tendencias hacia el futuro?**

**¿Cómo se verá afectada la disponibilidad hídrica natural?**

# Motivación

¿Qué va a pasar con los eventos extremos?



*Río Mapocho, 1986*



*Río Bío Bío, 2006*



*Río Cautín, 2006*



*Río Teno, 2008*



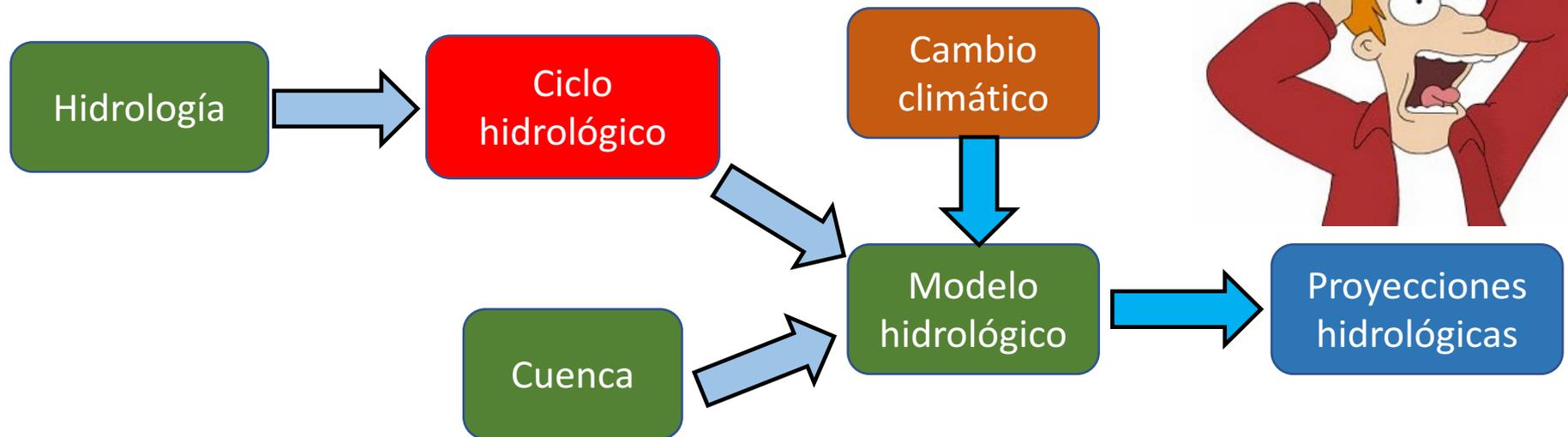
*Embalse La Paloma, 2015*



*Araucanía, 2015*

# ¿Cuánta agua traerán nuestros ríos durante las próximas décadas?

La respuesta no es trivial, y requiere una vuelta más larga...



# Conceptos

## ¿Qué es el ciclo hidrológico?

*Idealización del movimiento, distribución y circulación del agua en la Tierra*



# Conceptos

## ¿Qué es la Hidrología?

“**Ciencia** que aborda el agua en la Tierra, su existencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas, químicas y sus reacciones con el medio ambiente, incluyendo su relación con los organismos vivos”.

Consejo Federal  
para la Ciencia y la  
Tecnología de  
E.E.U.U (1962)

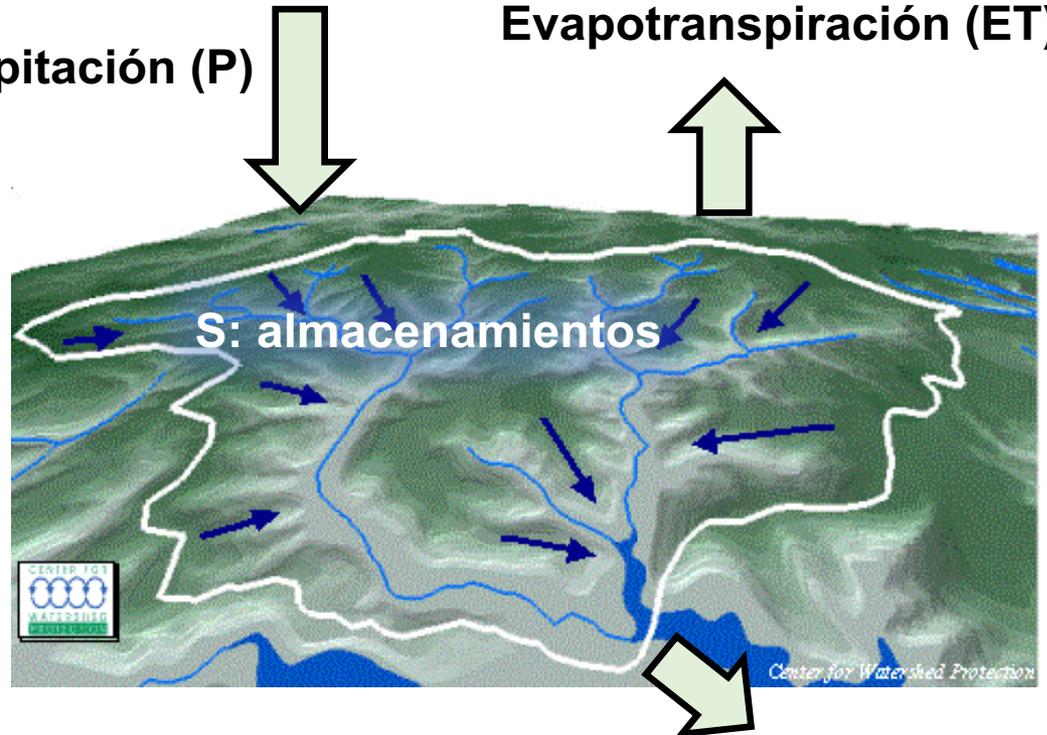


## ¿Qué es una cuenca?

**Unidad básica**, definida topográficamente y **drenada por un sistema de cauces superficiales**, de manera tal que toda la **escorrentía** que se genera dentro de la línea divisoria de aguas descarga hacia una **salida única e identificable**.

Precipitación (P)

Evapotranspiración (ET)



Escorrentía (Q)

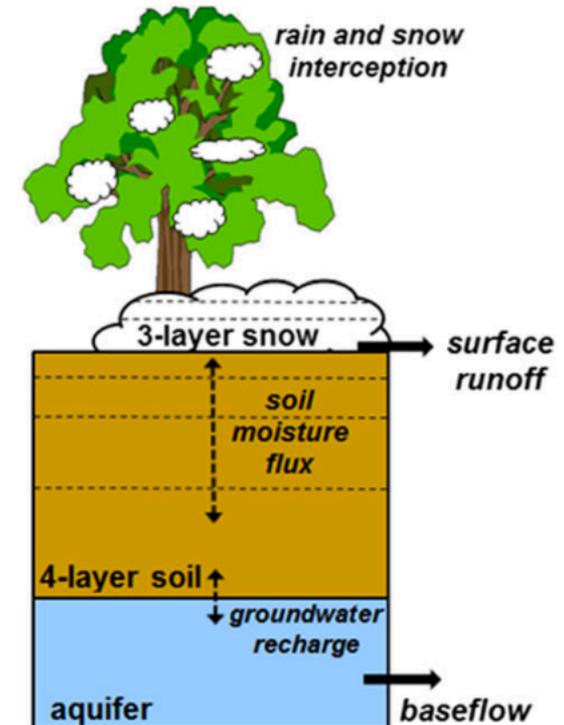
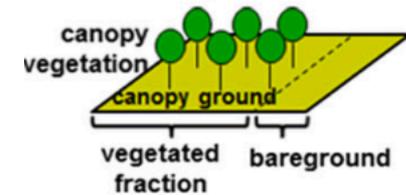
**En un periodo climatológico, lo esperable es  $P \sim Q + ET$**

# Conceptos

## ¿Qué es un modelo hidrológico?



*Semi-tile approach for computing longwave, latent heat, sensible heat and ground heat fluxes*

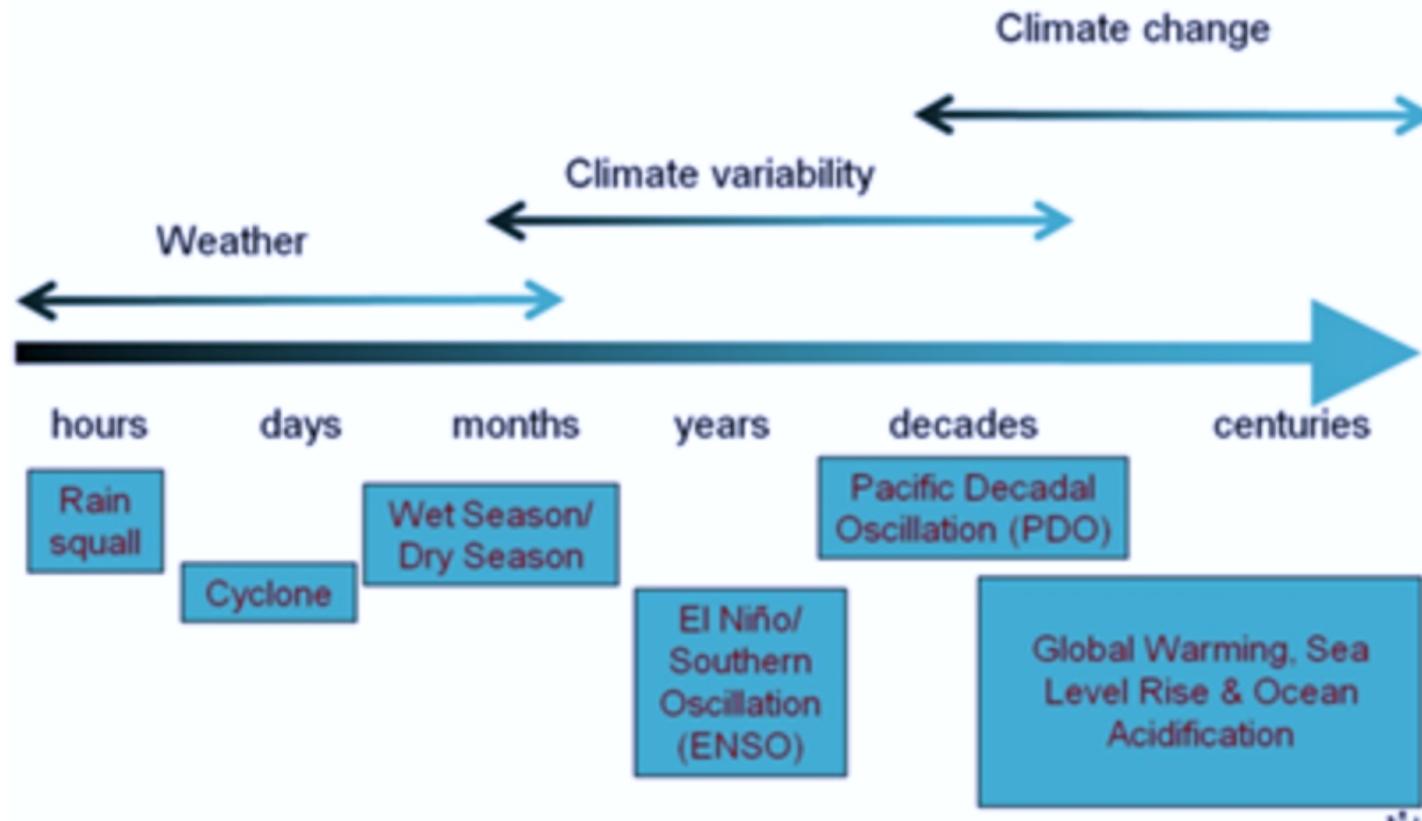


Los modelos hidrológicos son simplificaciones del mundo real

# Conceptos

## ¿Qué es el cambio climático?

- El **cambio climático** es una **variación continua en el largo plazo** de las condiciones climáticas promedio, o **variación continua en el rango de algunos fenómenos** (por ejemplo, tormentas extremas más frecuentes y más severas). Ambos también pueden de forma simultánea.

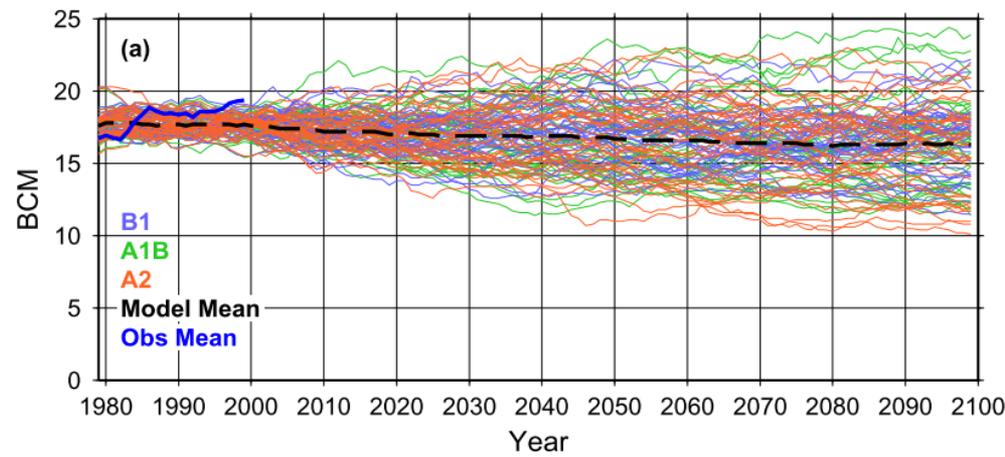
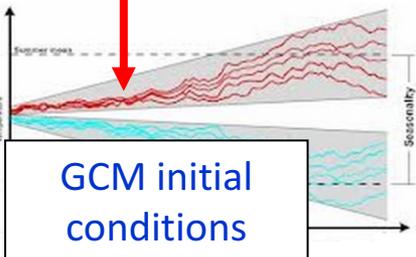
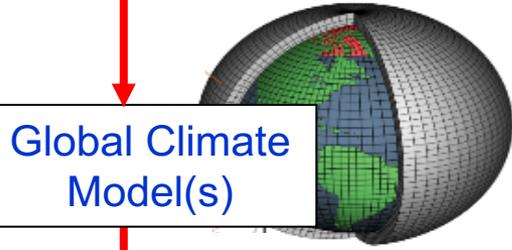
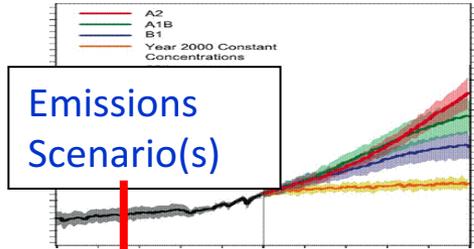


¡Detección vs. Atribución!

# Conceptos

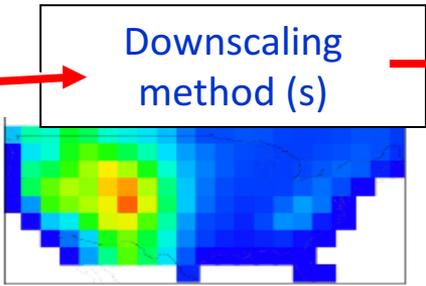
## ¿Qué es una proyección hidrológica?

- Es una **estimación futura sobre almacenamientos y flujos de agua**, efectuada en base a proyecciones entregadas por modelos climáticos.

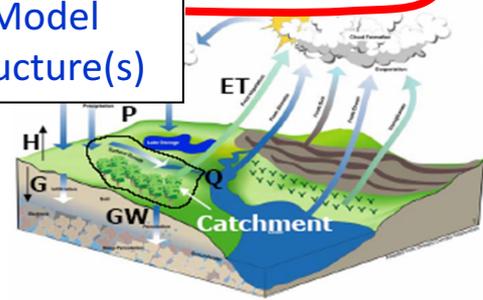


*Harding et al. 2012, HESS  
Colorado River at Lees Ferry*

Hydrologic Model Parameter(s)



Hydrologic Model Structure(s)



*La cascada de incertidumbre*

# Existe un creciente interés por caracterizar efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica

WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 42, W03S04, doi:10.1029/2005WR004362, 2006

**Getting the right answers for the right reasons:**

**Linking measurement**

**to advance the science**

James W. Kirchner<sup>1</sup>



WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 46, W05301, doi:10.1029/2009WR008906, 2010

**The future of hydrology: An evolving science for a changing world**

Thorsten Wagener,<sup>1</sup> Murugesu Sivapalan,<sup>2,3,4</sup> Peter A. Troch,<sup>5</sup> Brian L. McGlynn,<sup>6</sup>  
Ciaran J. Harman,<sup>3</sup> Hoshin V. Gupta,<sup>5</sup> Praveen Kumar,<sup>3</sup> P. Suresh C. Rao,<sup>7</sup>  
Nandita B. Basu,<sup>8</sup> and Jennifer S. Wilson<sup>2</sup>

Received 15 November 2009; revised 17 February 2010; accepted 10 March 2010; published 12 May 2010.

CLIMATE CHANGE

**Stationarity Is Dead  
Whither Water?**

P. C. D. Milly,<sup>1\*</sup> Julio Betancourt,<sup>2</sup> Malin Falkner,<sup>3</sup>  
Kundzewicz,<sup>5</sup> Dennis P. Lettenmaier,<sup>6</sup> Ronald

Curr Clim Change Rep (2016) 2:55–64

DOI 10.1007/s40641-016-0034-x

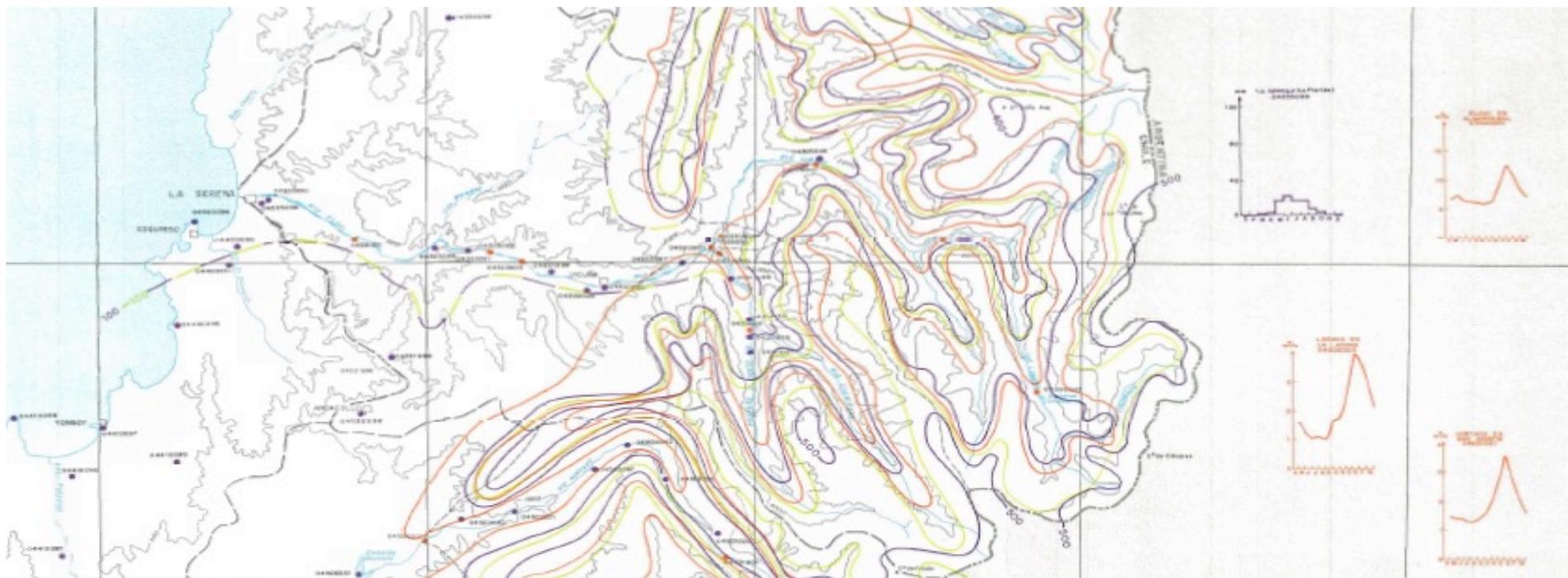
HYDROLOGIC IMPACT (SOCIETY AND WATER CYCLES) (E GUTMANN, SECTION EDITOR)

**Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts  
of Climate Change**

Martyn P. Clark<sup>1</sup> · Robert L. Wilby<sup>2</sup> · Ethan D. Gutmann<sup>1</sup> · Julie A. Vano<sup>1</sup> ·  
Subhrendu Gangopadhyay<sup>3</sup> · Andrew W. Wood<sup>1</sup> · Hayley J. Fowler<sup>4</sup> ·  
Christel Prudhomme<sup>2,5</sup> · Jeffrey R. Arnold<sup>6</sup> · Levi D. Brekke<sup>3</sup>

# ¿Qué sabemos de la Hidrología en Chile?

## Resultados balance hídrico 1987



- Impulsado por la UNESCO desde 1982.
- Partió con estudios regionales en cuencas exorreicas y endorreicas.
- Basado en la ecuación de continuidad:

$$\Delta S = P + Q_{si} + Q_{gi} - E - ET - Q_{so} - Q_{go} + \eta$$



DGA (1987)

# ¿Qué sabemos de la Hidrología en Chile?

## Resultados balance hídrico 1987



BALANCES HIDRICOS  
(en régimen natural)

|  | PRECIPITACION        |      | ESCORRENTIA          |      | EVAPORACION          |      |
|--|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
|  | m <sup>3</sup> /s    | mm   | m <sup>3</sup> /s    | mm   | m <sup>3</sup> /s    | mm   |
| I y II                                       | 340                  | 58,8 | 21                   | 3,6  | 319                  | 55,3 |
| III a X                                      | 13120                | 1246 | 9130                 | 867  | 3990                 | 379  |
| XI y XII                                     | 23490                | 2363 | 20260                | 2555 | 3230                 | 408  |
| CHILE (Excluye Territorio Chileno Antártico) | 36950                | 1522 | 29411                | 1211 | 7539                 | 311  |
| SUDAMERICA                                   | 888x10 <sup>3</sup>  | 1564 | 351x10 <sup>3</sup>  | 618  | 537x10 <sup>3</sup>  | 946  |
| MUNDIAL (Fase Terrestre)                     | 3522x10 <sup>3</sup> | 746  | 1256x10 <sup>3</sup> | 266  | 2266x10 <sup>3</sup> | 480  |

# Actualización del Balance Hídrico Nacional



**Jefa de proyecto:  
Prof. Ximena Vargas**



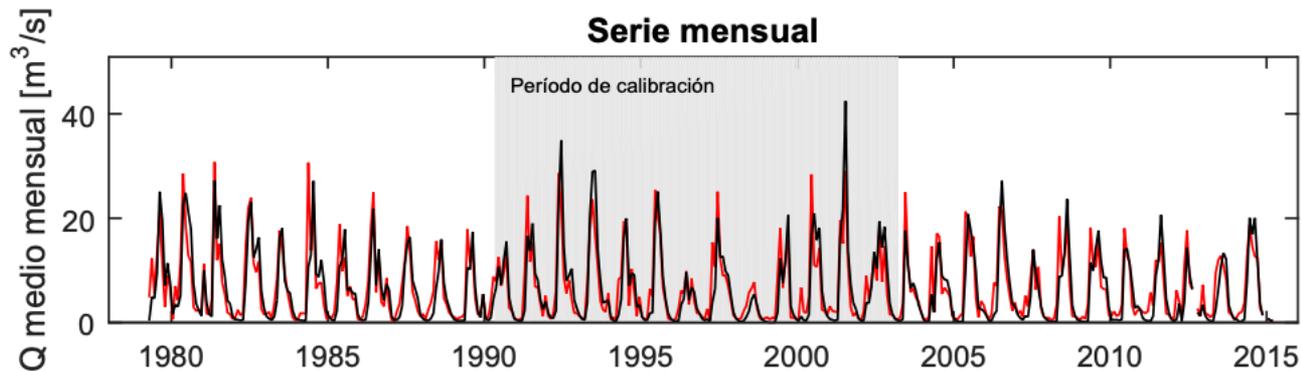
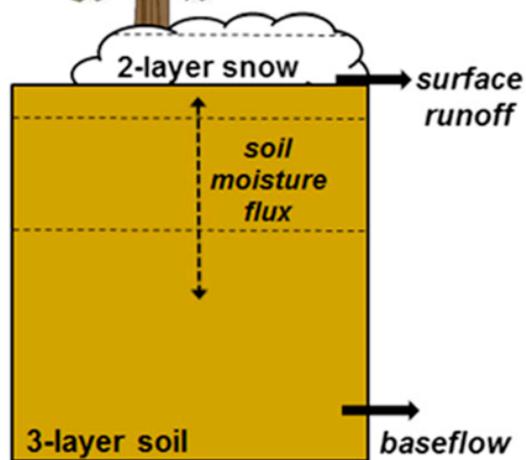
- Trabajo multi-disciplinario e inter-institucional, desde 2016.
- Primer esfuerzo por caracterizar la hidrología de Chile continental para condiciones climáticas presentes y futuras.

# Actualización del Balance Hídrico Nacional

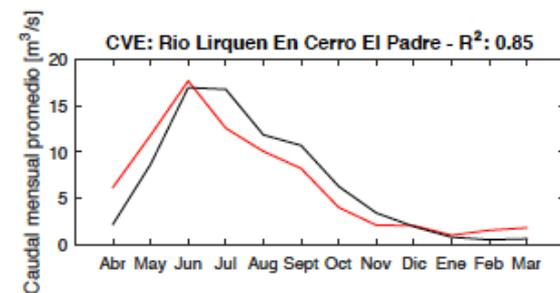
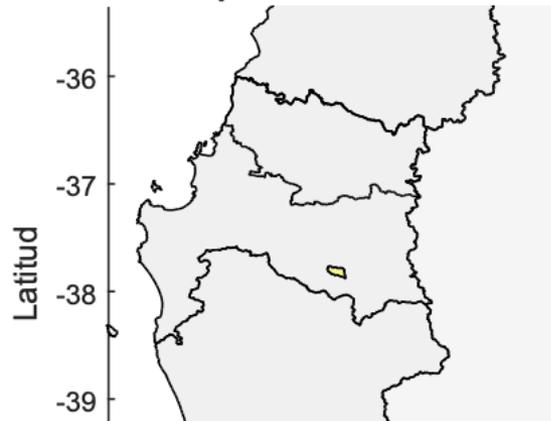
Mosaic representation of different vegetation coverages at each cell



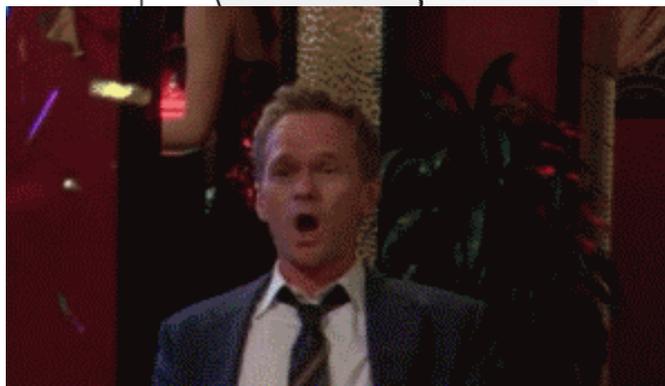
rain and snow interception



Rio Lirquen En Cerro El Padre



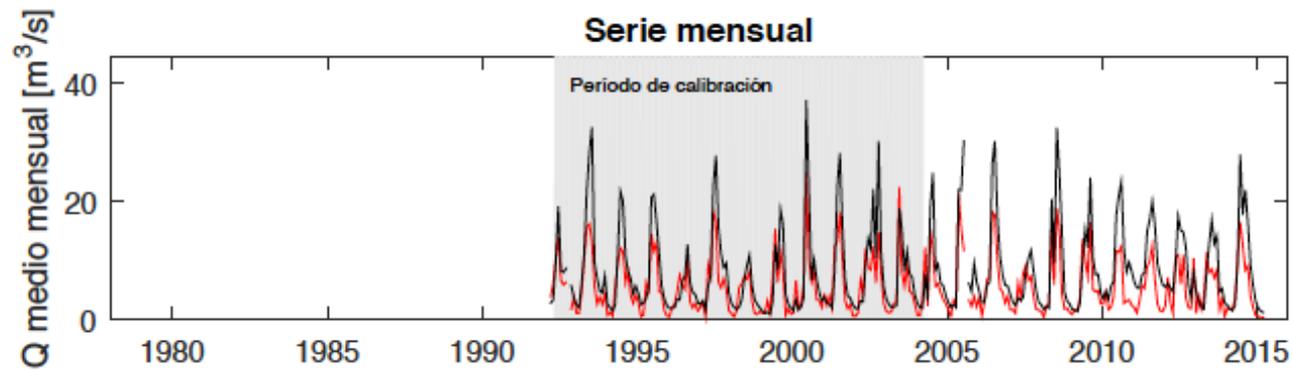
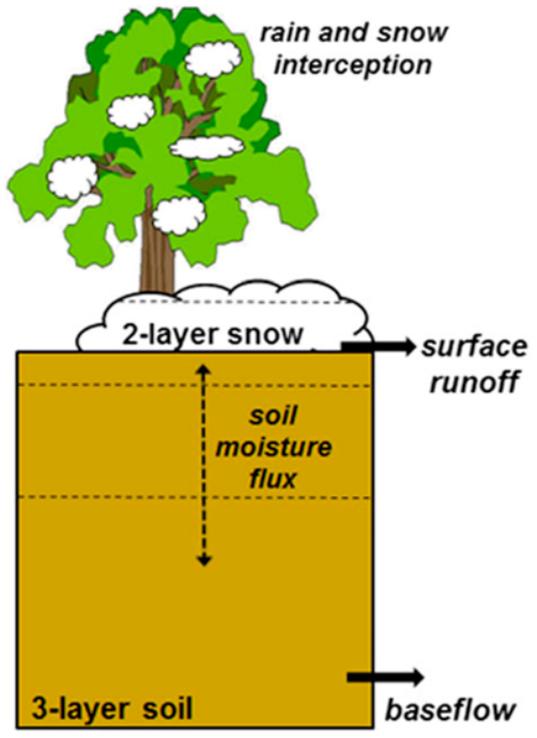
- Calibración del modelo VIC en cuencas en régimen natural.
- Evaluación con métricas tradicionales e índices hidrológicos.
- Verificación utilizando información satelital.



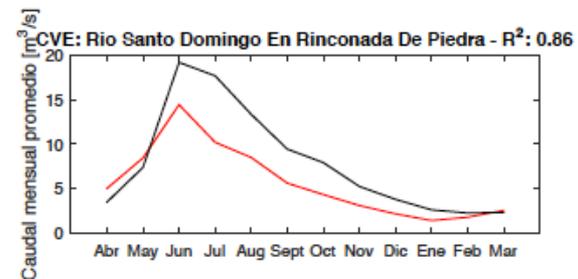
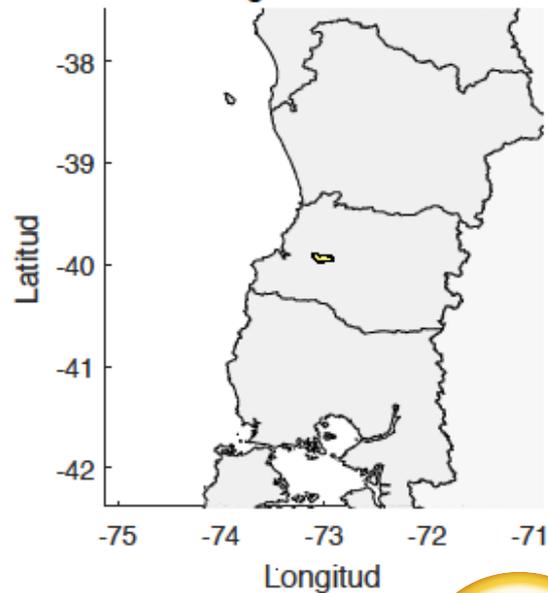
**Arquitectura del modelo VIC**

# Actualización del Balance Hídrico Nacional

Mosaic representation of different vegetation coverages at each cell



Rio Santo Domingo En Rinconada De Piedra



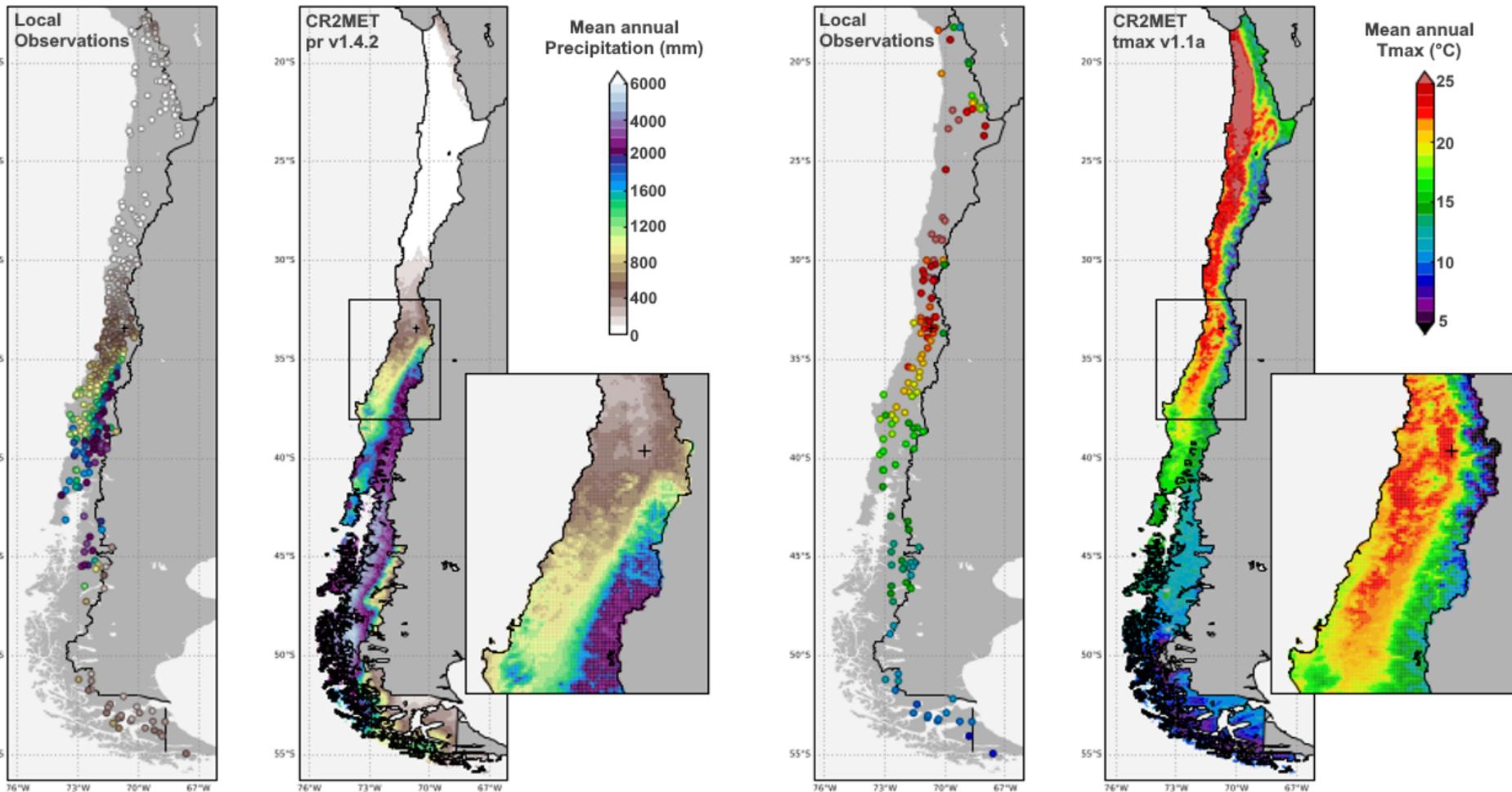
- Calibración del modelo VIC en cuencas en régimen natural.
- Evaluación con métricas tradicionales e índices hidrológicos.
- Verificación utilizando información satelital.



Arquitectura del modelo VIC

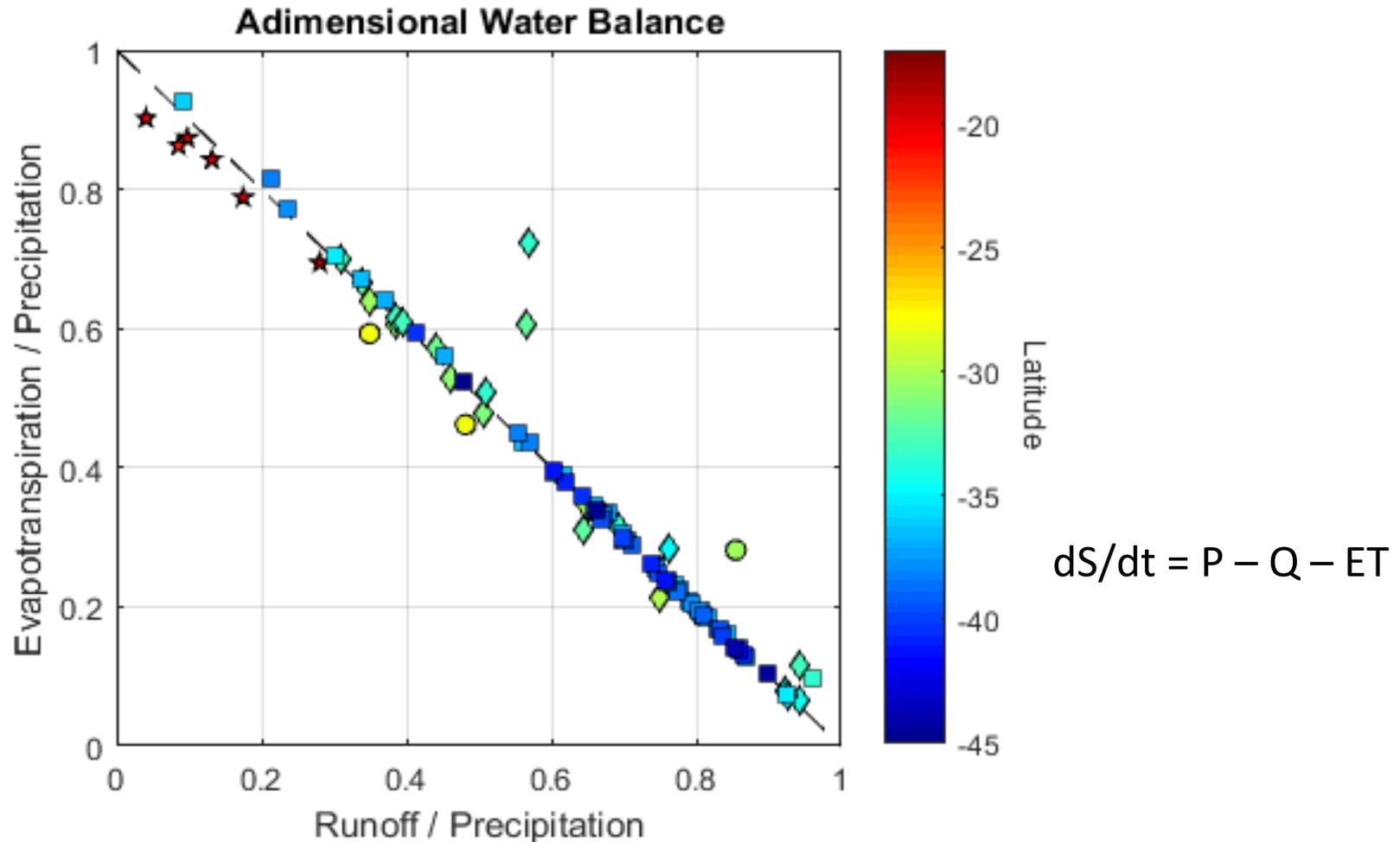
# Actualización del Balance Hídrico Nacional

*¿Cómo se distribuyen la precipitación y la temperatura en Chile?*

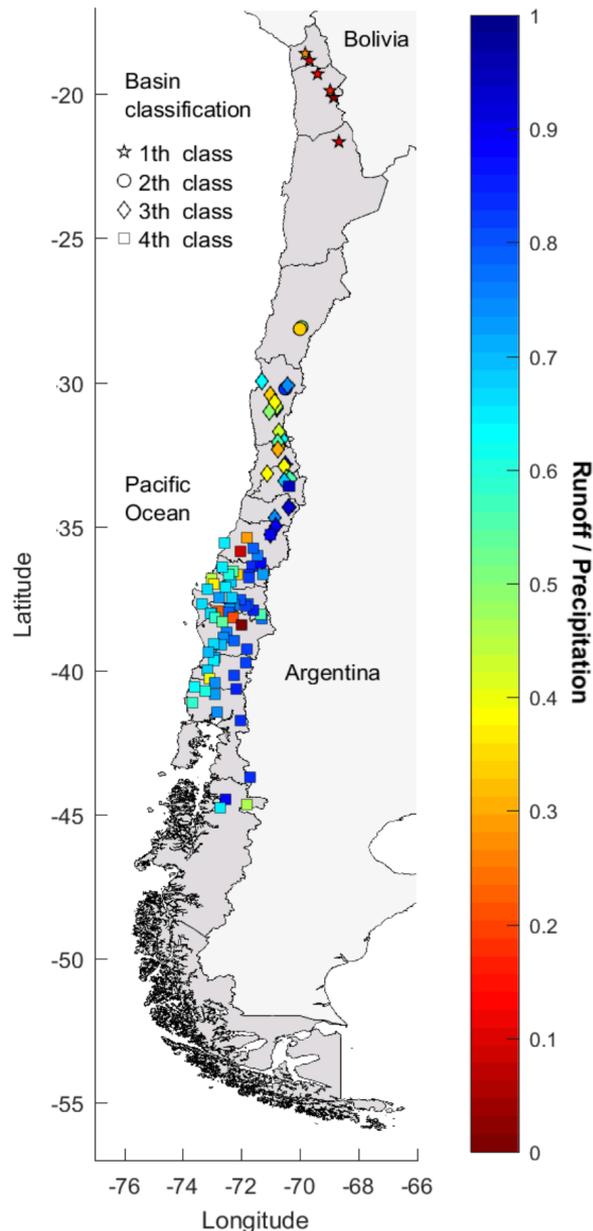


# Actualización del Balance Hídrico Nacional

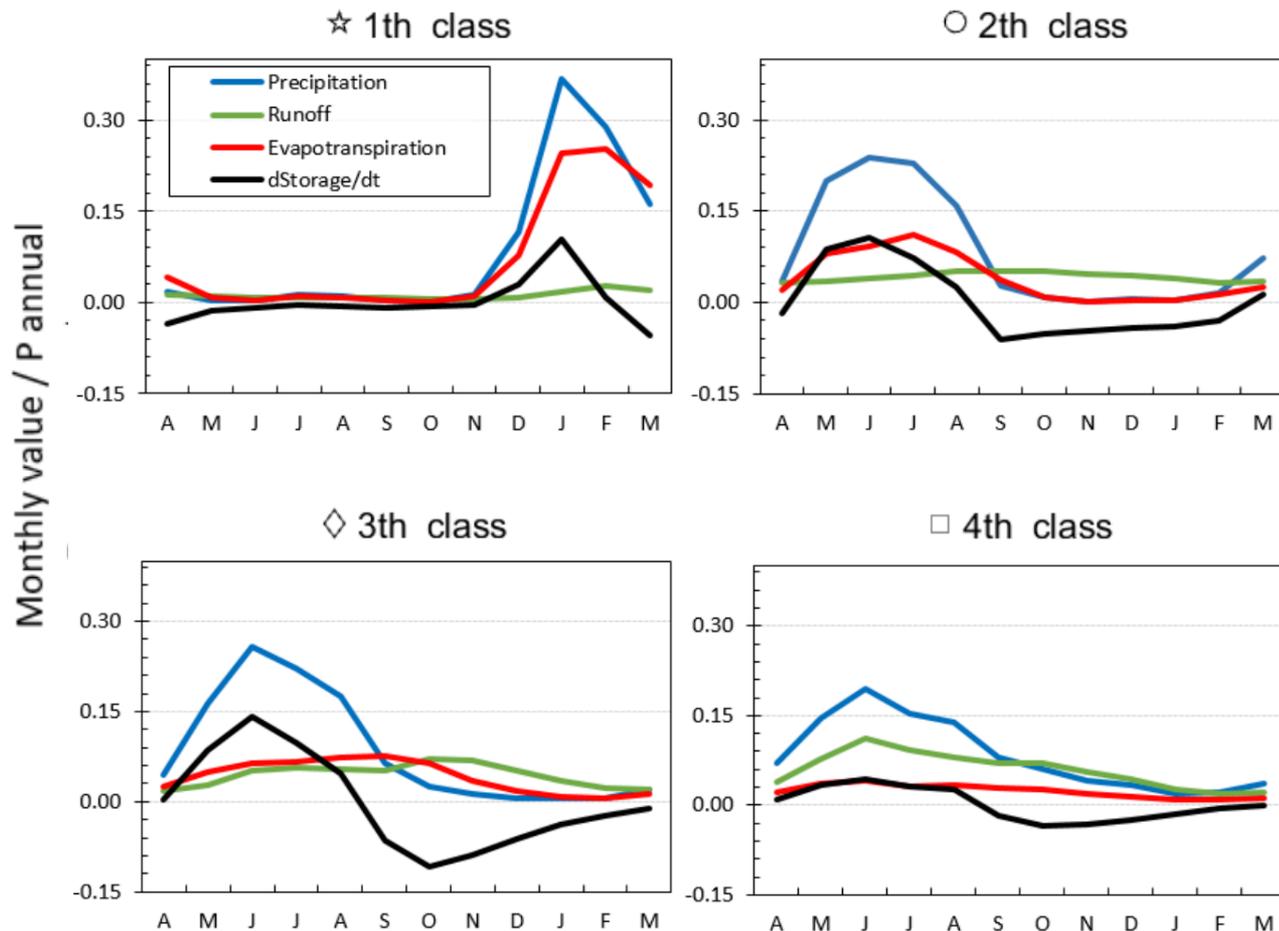
*¿Cómo varía la partición de la precipitación anual a lo largo del territorio?*



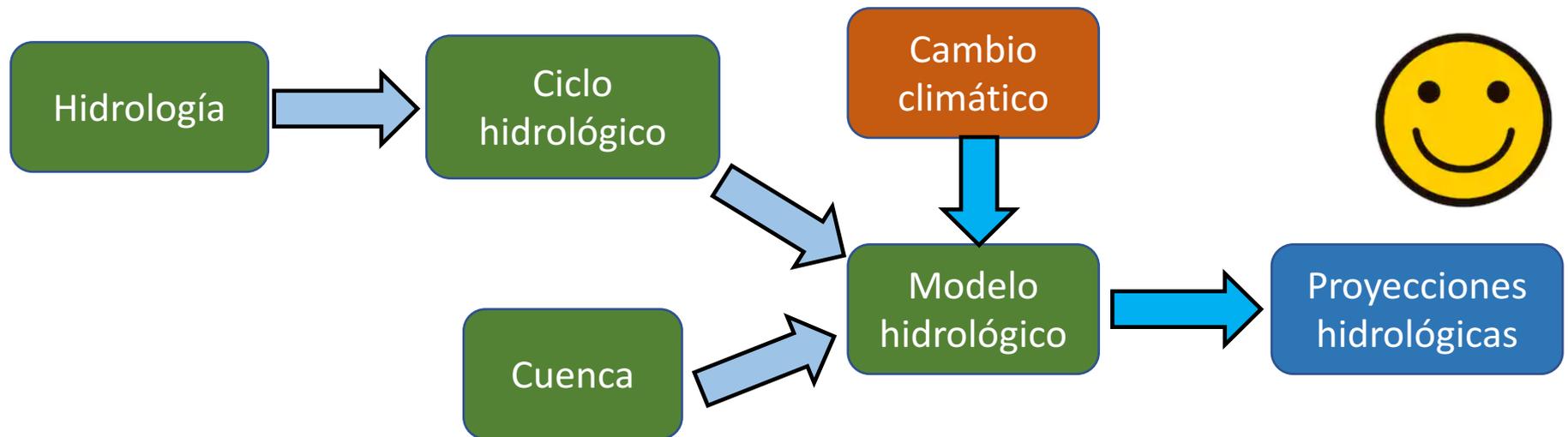
# Actualización del Balance Hídrico Nacional



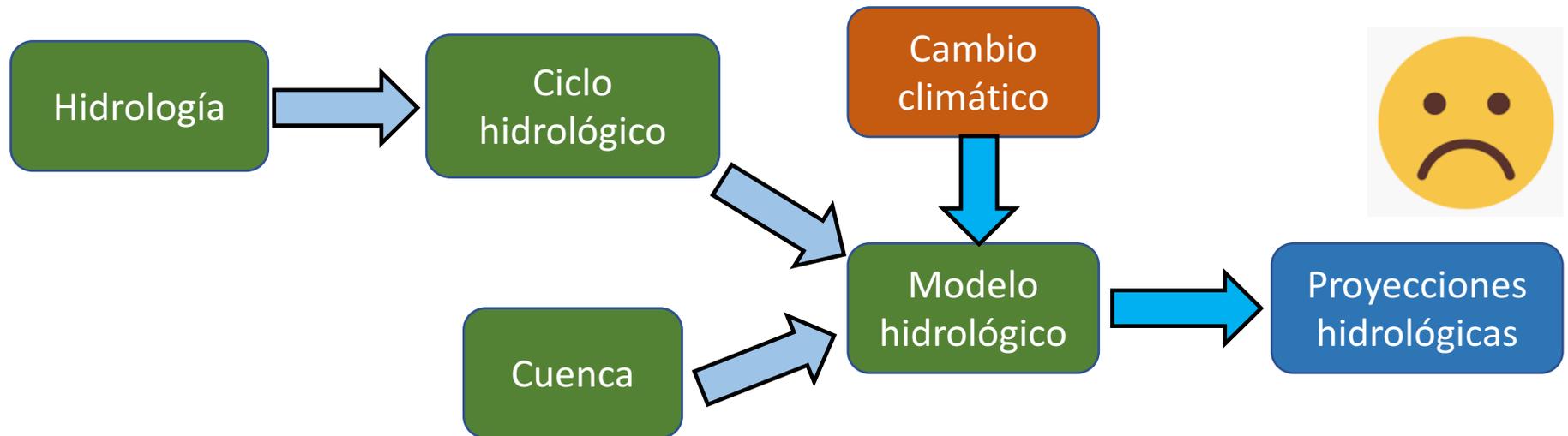
*¿Cómo varía la estacionalidad de flujos y almacenamientos a lo largo del territorio?*



# ¿Cuánta agua traerán nuestros ríos durante las próximas décadas?

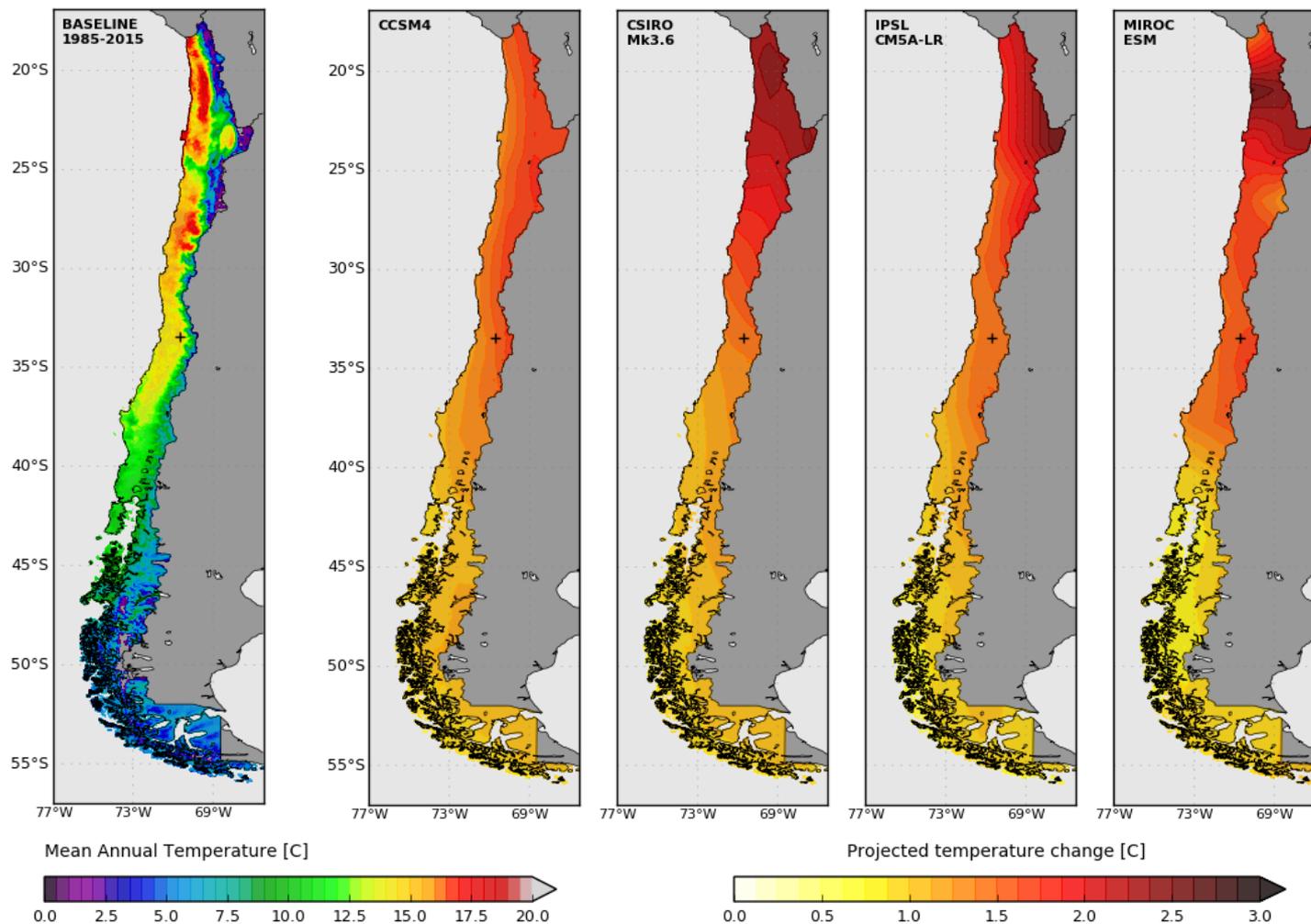


# ¿Cuánta agua (menos) traerán nuestros ríos durante las próximas décadas?



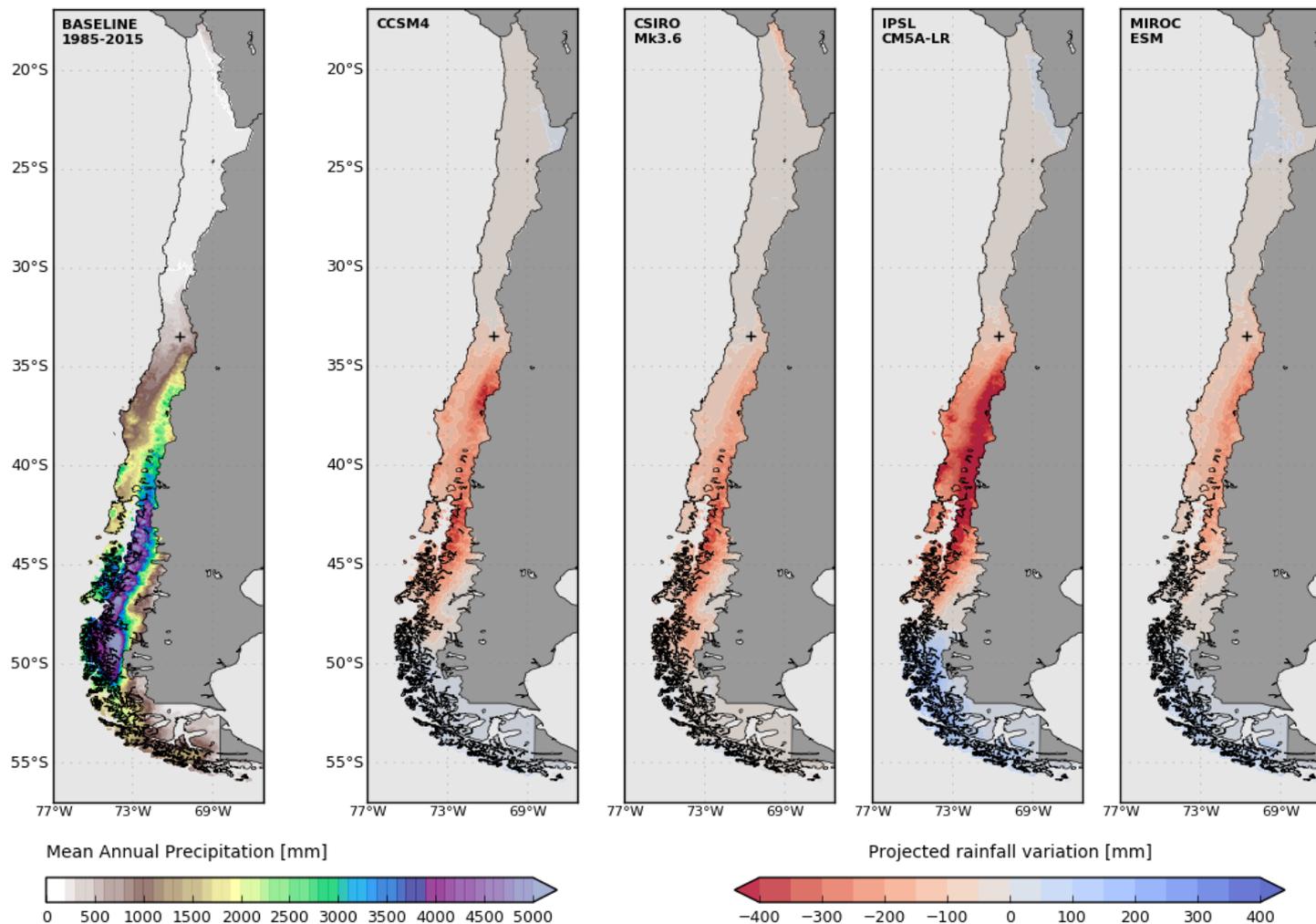
# Cambios proyectados (2030-2060)

*¿Qué pasará con la temperatura?*



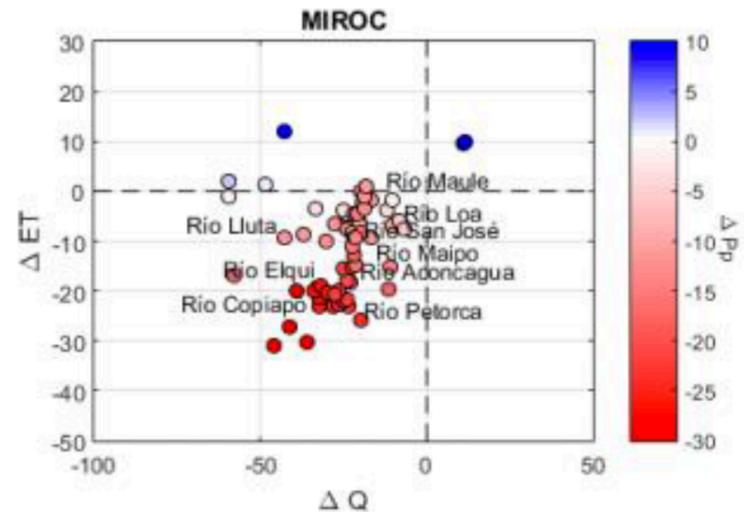
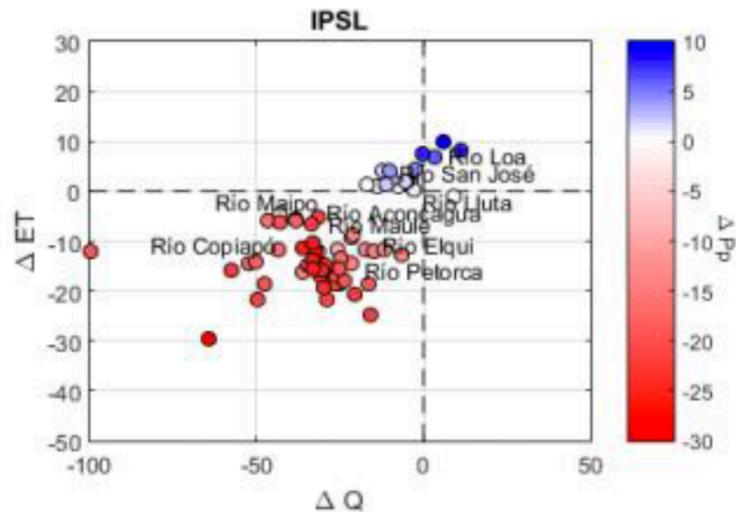
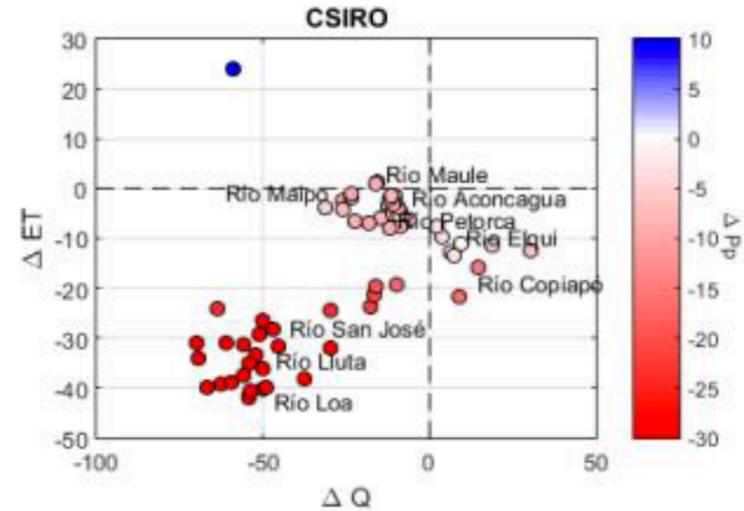
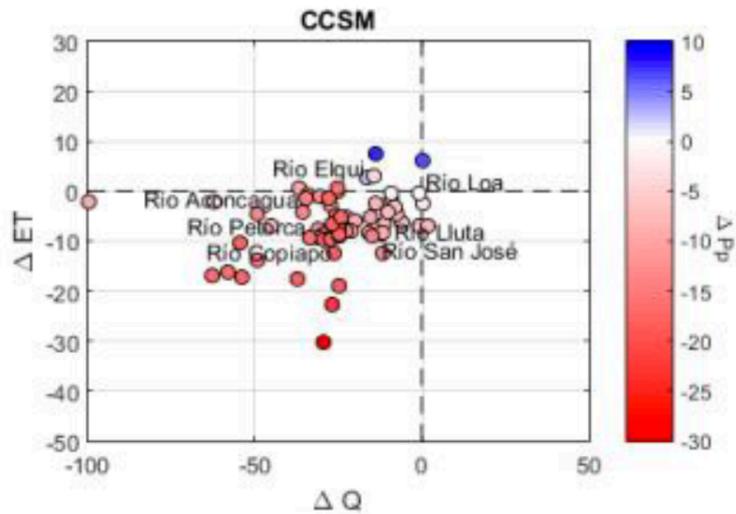
# Cambios proyectados (2030-2060)

*¿Qué pasará con la precipitación?*



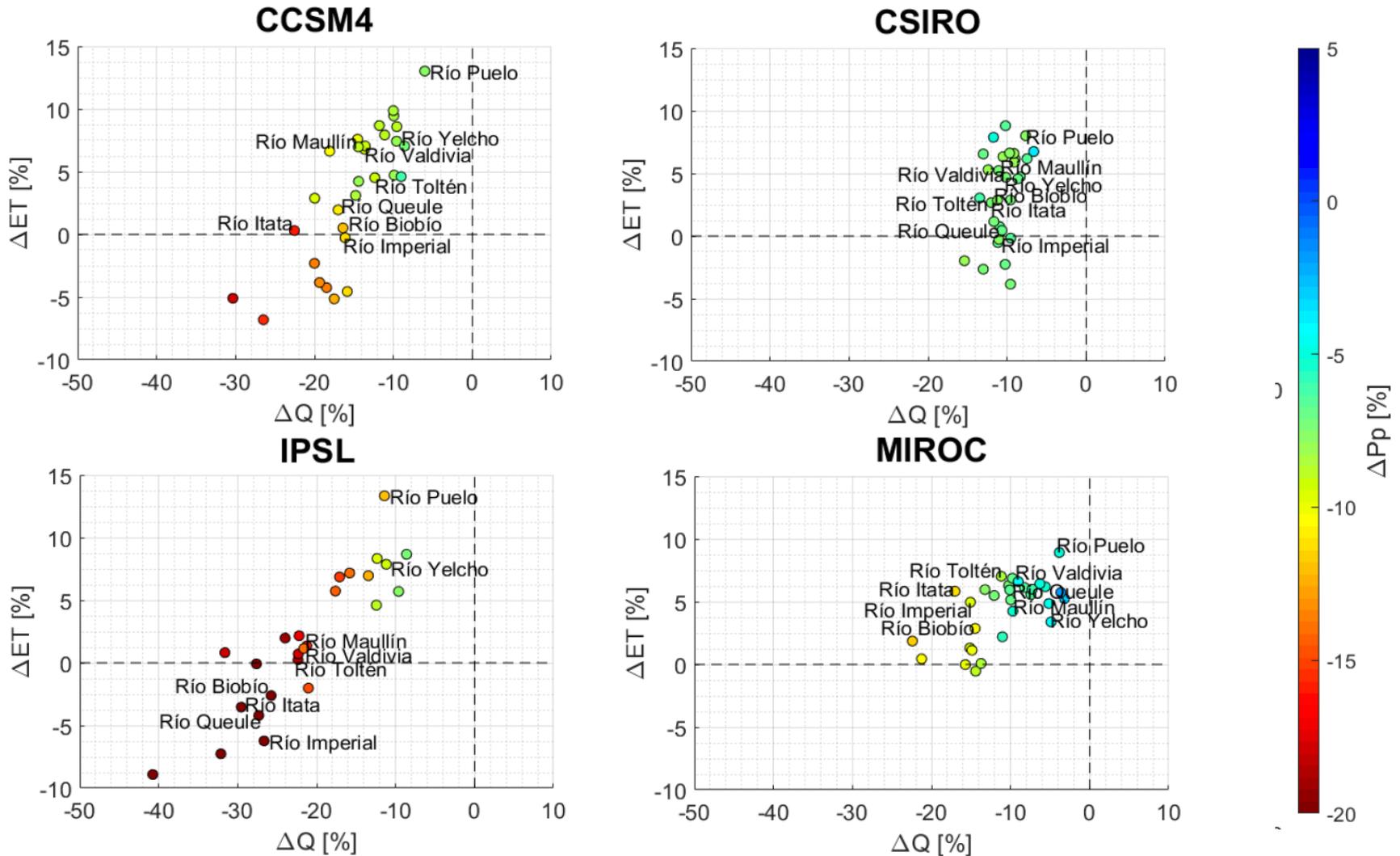
# Cambios proyectados (2030-2060)

*¿Qué pasará con la escorrentía y la evapotranspiración anuales?*



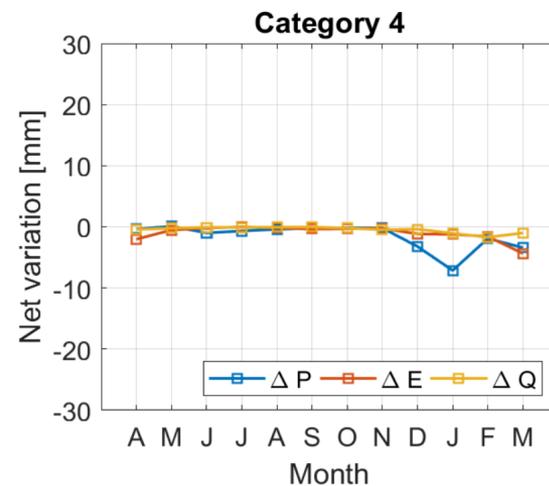
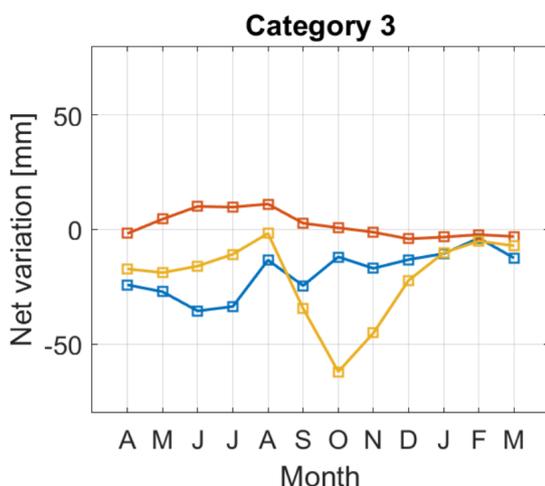
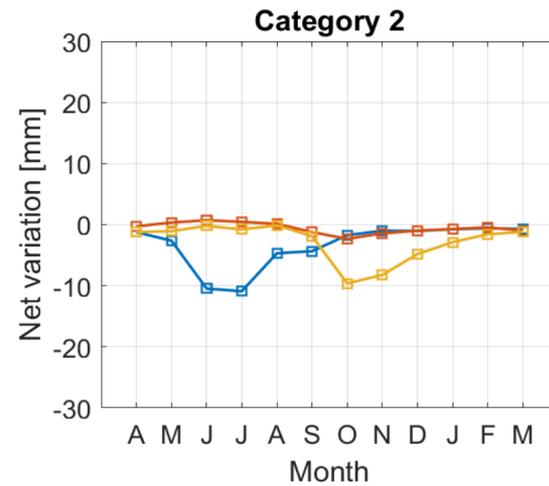
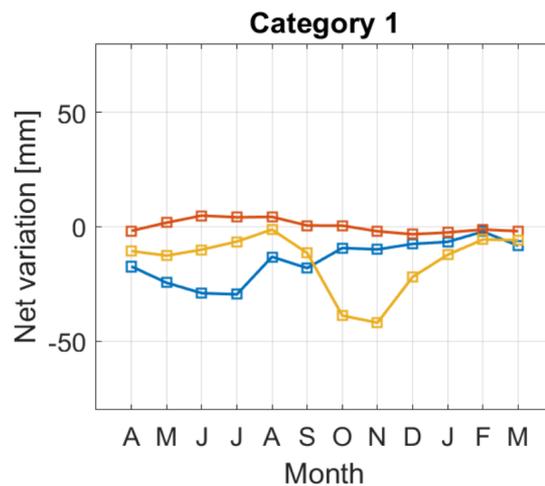
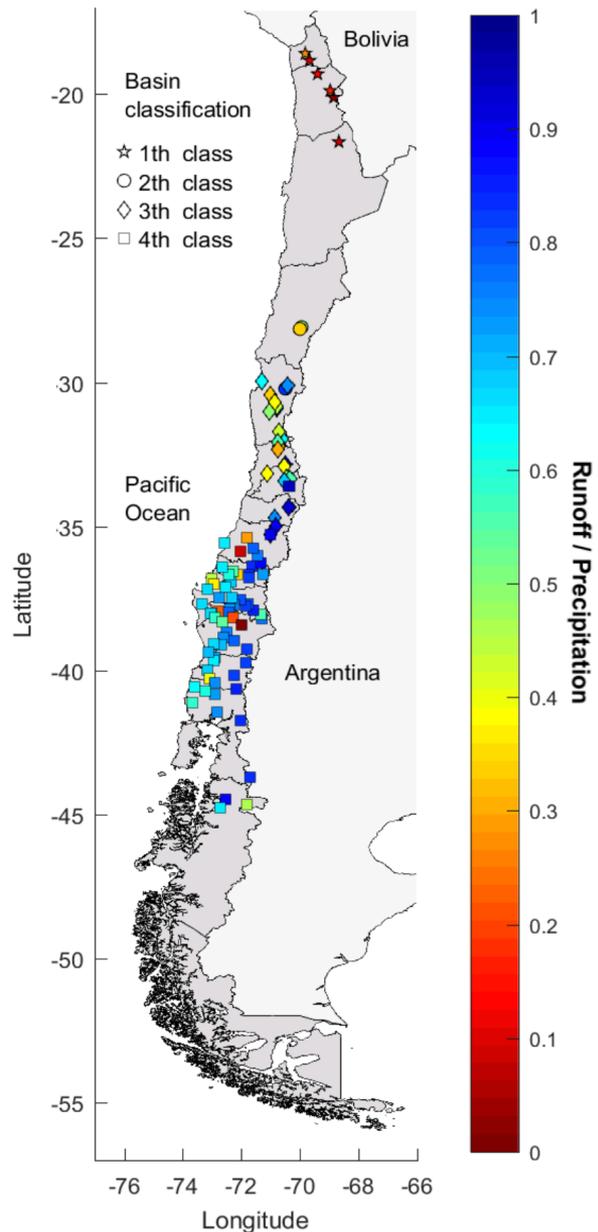
# Cambios proyectados (2030-2060)

*¿Qué pasará con la escorrentía y la evapotranspiración anuales?*



# Cambios proyectados (2030-2060)

¿Cómo cambiará la estacionalidad de P, Q y ET?



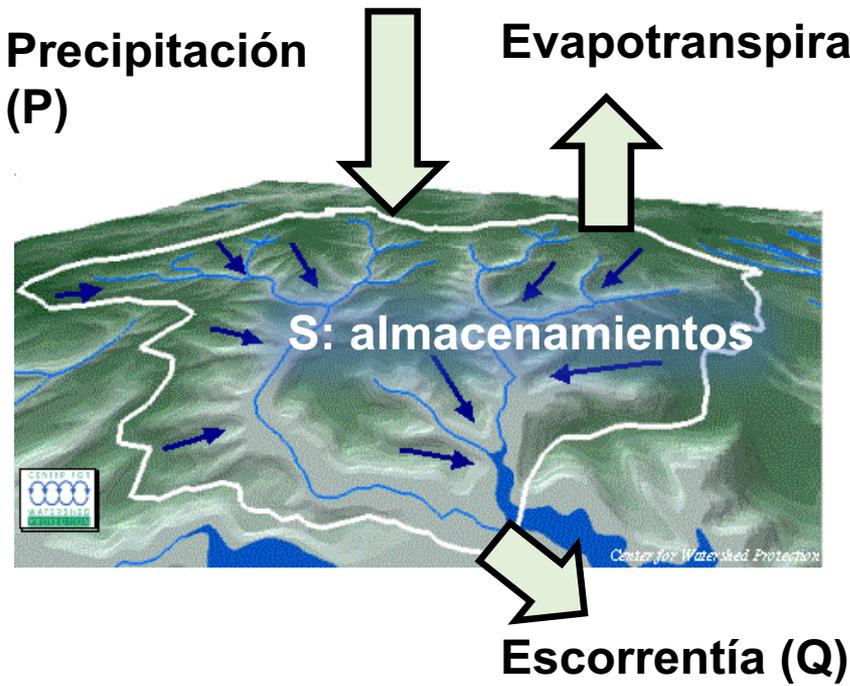
# Perspectivas finales

1. Existe una enorme variabilidad espacial a lo largo del territorio nacional, tanto en características fisiográficas, variables climáticas y almacenamientos/flujo de agua.
2. En la actualidad, el gran desafío es caracterizar la disponibilidad hídrica ante la **escasez de datos** y **escenarios de cambio global**.
3. Otro desafío: el rol de los humanos en sistemas hidrológicos.
4. Se requieren mayores esfuerzos para mejorar estimaciones presente y futuras de balance hídrico, mediante la combinación de observaciones (in-situ y remotas) y modelos numéricos.

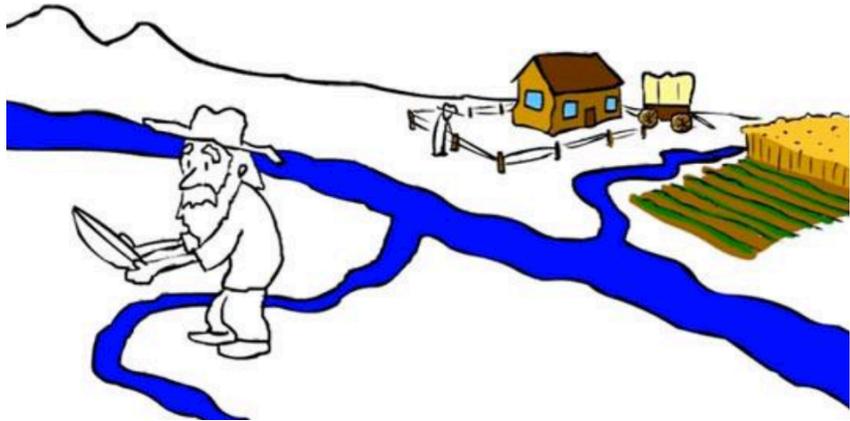
Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC.



# Oferta natural (esta presentación)



## Demanda



<https://www.kunc.org/post/video-schoolhouse-rock-water-rights#stream/0>



¿Sabemos cuánta agua transportan nuestros ríos? Oferta natural v/s demanda legal

FECHA 23/07/2020

pamendoz@uchile.cl

# Gracias

