



**fcfm**

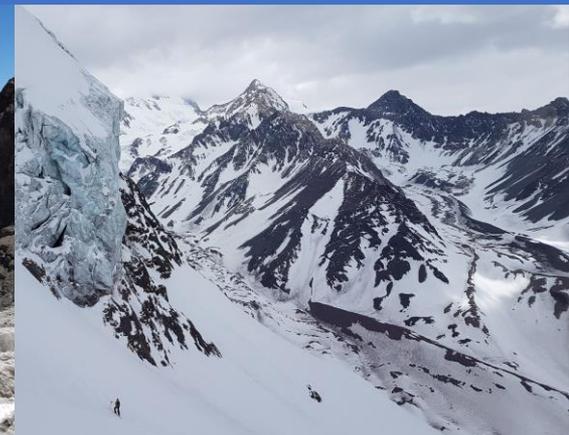
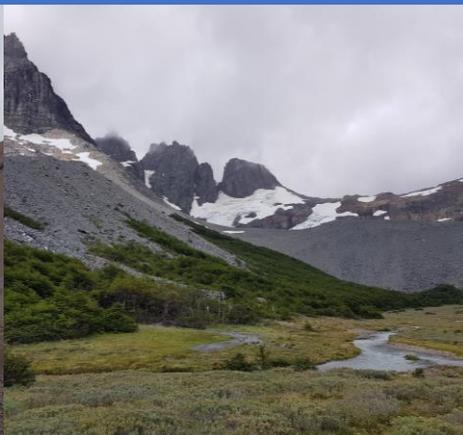
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# PROYECCIONES DE CAMBIO HIDROLÓGICO EN EL BALANCE HÍDRICO NACIONAL

**Eduardo Muñoz-Castro**<sup>1</sup>, **Dimitri Dionizis**<sup>2</sup>, **Javier Cepeda**<sup>1</sup>, **Nicolás Vásquez**<sup>1</sup>, **Tomás Gomez**<sup>1</sup>, **Pablo Mendoza**<sup>1,2</sup>, **Miguel Lagos**<sup>1,2</sup>, **Camila Álvarez**<sup>3</sup>, **Juan Pablo Boisier**<sup>3</sup>, **Linda Daniele**<sup>4</sup>, **Cristóbal Mendez**<sup>1</sup>, **Ximena Vargas**<sup>1</sup>

1. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
2. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile
3. Center for Climate and Resilience Research (CR<sup>2</sup>)
4. Departamento de Geología, Universidad de Chile



# Motivación

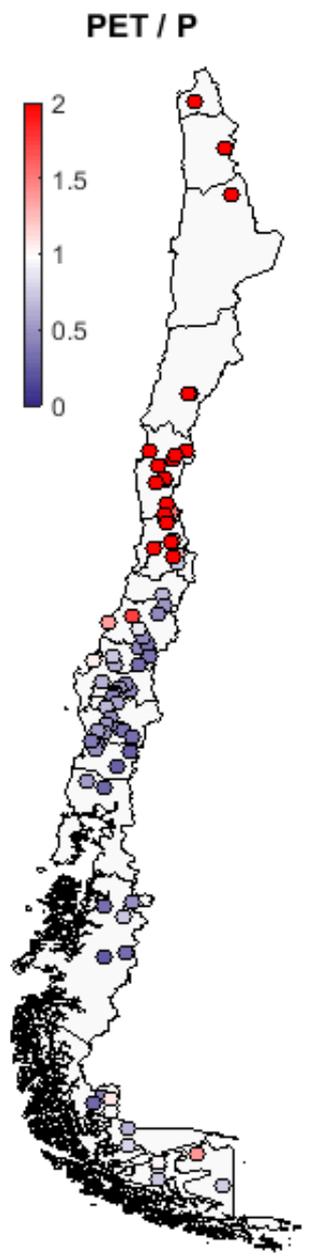
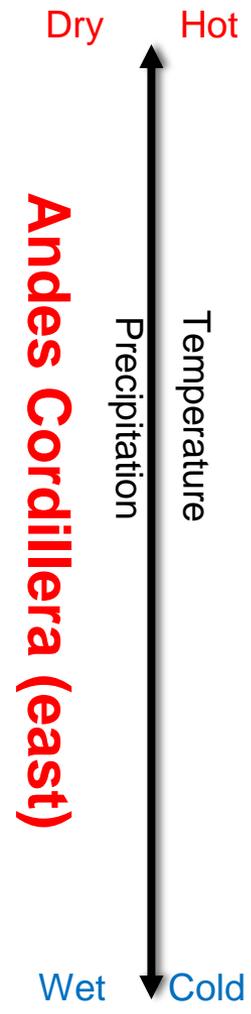
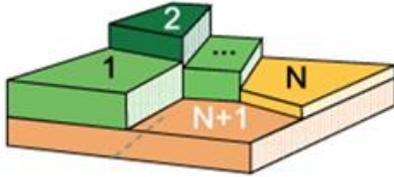


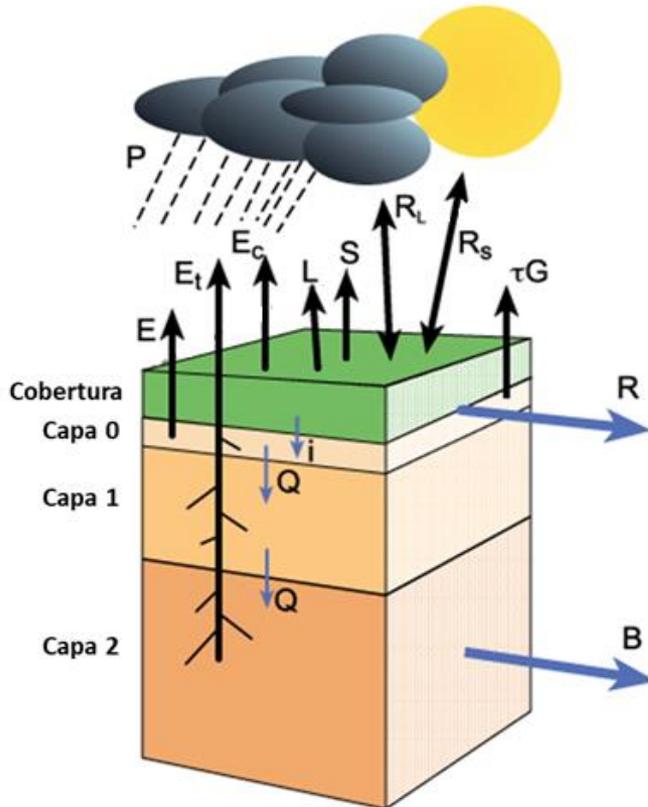
Fig. Nicolás Vásquez

# Modelo hidrológico

Cobertura de suelo a nivel de celda



Balance a nivel de celda



## □ Variable Infiltration Capacity (VIC)

- De base física y semi-distribuido, considera heterogeneidad por tipo de vegetación.
- **Balance de masa y energía** en cada (sub-)unidad.

## □ Forzantes meteorológicas (Entradas)

- Precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento.

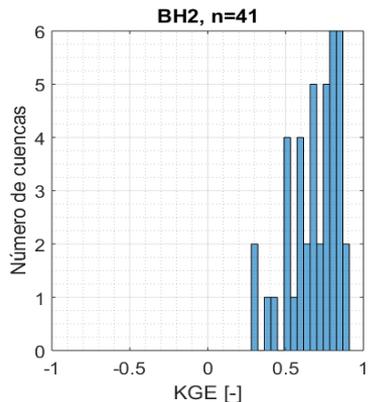
## □ Simulaciones

- Resolución espacial  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ,  $dt = 3$  hr.
- Período de *spin-up* (i.e., inicialización de variables de estado): años hidrológicos 1979/80-1984/85.
- Aproximadamente 2/3 del período para calibración, 1/3 para validación.

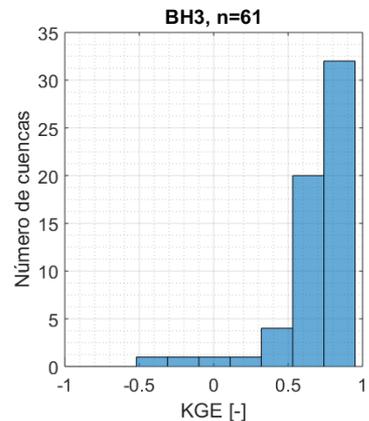
## □ Salidas del modelo

- Evapotranspiración natural (ET), fracción de área cubierta por nieve (fSCA), escorrentía superficial (Q), recarga, riego mensual, humedad del suelo (SM), equivalente de agua nieve (SWE).

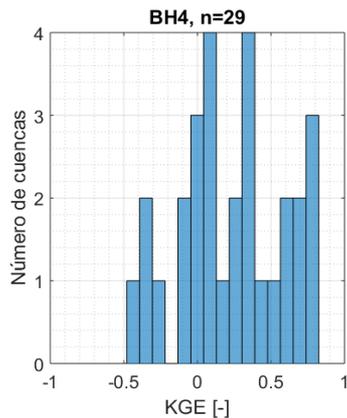
# Resumen Nacional



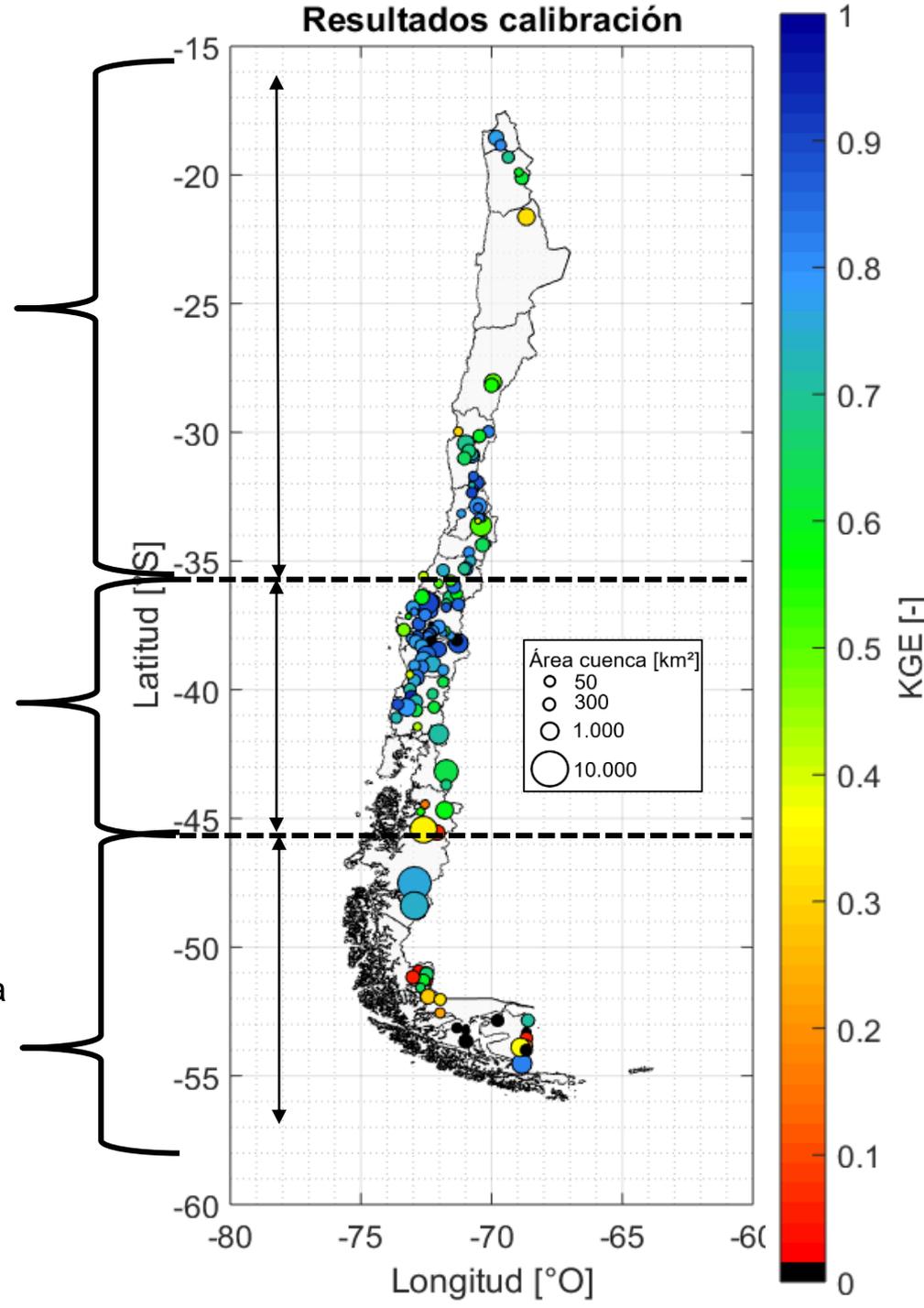
Balance Norte-Centro (BH2)  
[Arica-Maule]  
**CR2MET v1.3**



Balance Sur y parte norte  
Macrozona Austral (BH3)  
[Río Ñuble-Río Cisnes]  
[Ñuble-Aysén]  
**CR2MET v1.4.2**



Balance parte sur Macrozona  
Austral (BH4)  
[Río Cisnes-Río Róbalo]  
[Aysén-Magallanes]  
**CR2MET v2.0**



# Resumen Metodológico

Abril/1985 –Marzo/2015  
30 años

**Selección de cuencas en régimen natural**

- Análisis de base de datos CAMELS-CL.
- Elección en base a grado de intervención humana.

**Calibración de VIC en cuencas en régimen natural**

- Calibración mediante SCE-UA (Búsqueda global).
- Verificación de procesos hidrológicos

**Regionalización (transferencia) de parámetros**

- Clasificación de píxeles.
- Similitud cuenca-píxel.
- PUB.

**Demanda de Riego**

**Aporte glaciar**

**Modelación hidrológica regional**

- Transferencia de parámetros a cuencas no controladas.
- Verificación de procesos hidrológicos.
- Incorporación de aporte glaciar y riego

$$Q_{final} = Q_{VIC} + Q_{glaciar} - Q_{riego}$$

**Estimación del balance hídrico bajo escenarios de cambio climático**

# Cambio Climático (Conceptos Clave)

Forzantes

Variables que condicionan el comportamiento de un sistema, dadas sus propiedades (e.g., la precipitación y temperatura), condicionan la respuesta de una cuenca, que, dependiendo de sus atributos, generará distintos procesos de escurrimiento.

Reanálisis Climático

Simulación atmosférica computacional que incorpora observaciones terrestres de distintas fuentes de información. Ejemplo: NCEP/NCAR, ERA5, etc.

GCM

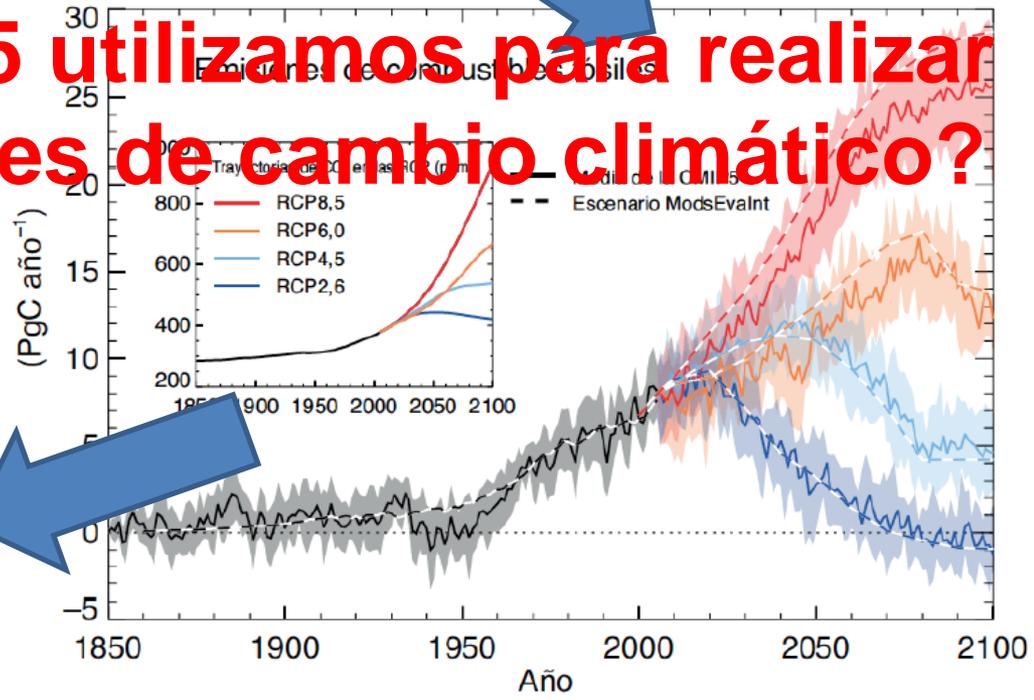
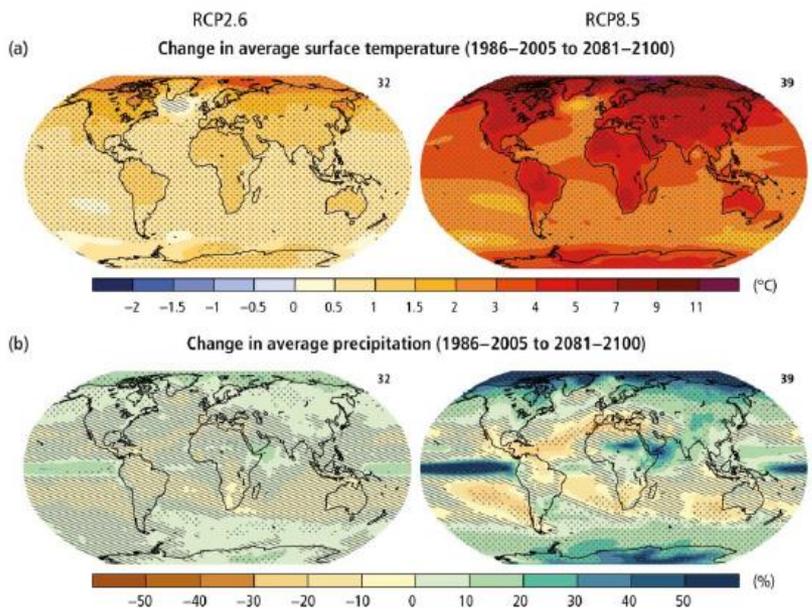
Modelos de circulación general de la atmósfera, utilizados para realizar simulaciones climáticas globales **bajo distintos escenarios.**

**¿Es lo mismo hablar de escenario y modelo de cambio climático?**

# Cambio Climático (Conceptos Clave)

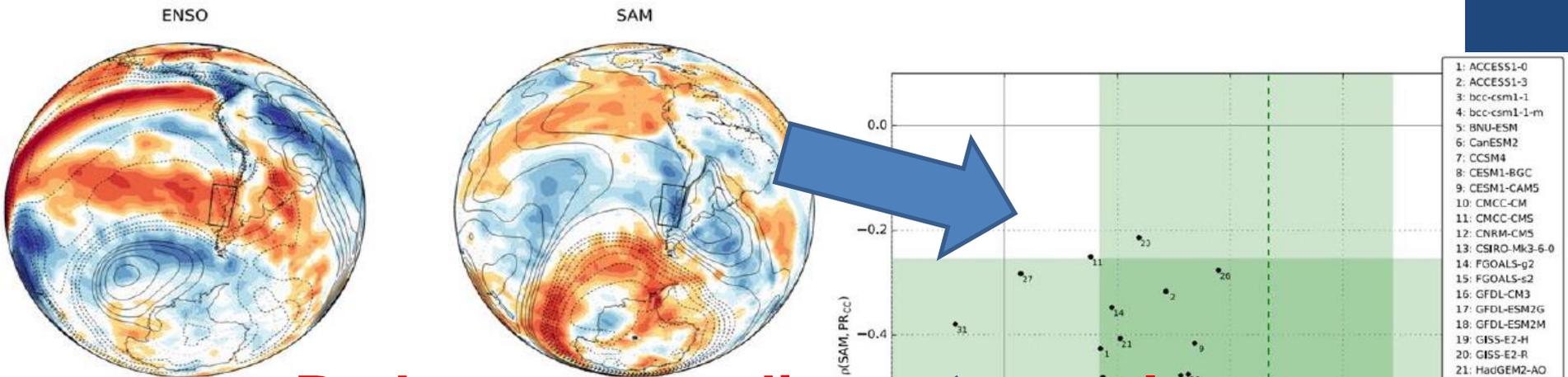
Escenario	Forzante de Radiación [ $Wm^{-2}$ ]	Concentración [ppm]	Comportamiento
RCP 8.5	>8.5 en el año 2100	> 1370 CO <sub>2</sub> equivalente en 2100	En aumento
RCP 6.0	~ 6 una vez estabilizado después del año 2100	~ 850 CO <sub>2</sub> equiv. (estabilización posterior al año 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 4.5	~ 4.5 una vez estabilizado después del año 2100	~ 650 CO <sub>2</sub> equiv. (estabilización posterior al año 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 2.6	Radiación máxima de ~ 3 antes del año 2100 con descenso posterior	Concentración máxima de ~ 490 de CO <sub>2</sub> equiv. Antes del año 2100, con descenso posterior	Valor máximo a mediados de siglo y posterior descenso

¿Qué GCM del CMIP5 utilizamos para realizar nuestras proyecciones de cambio climático?

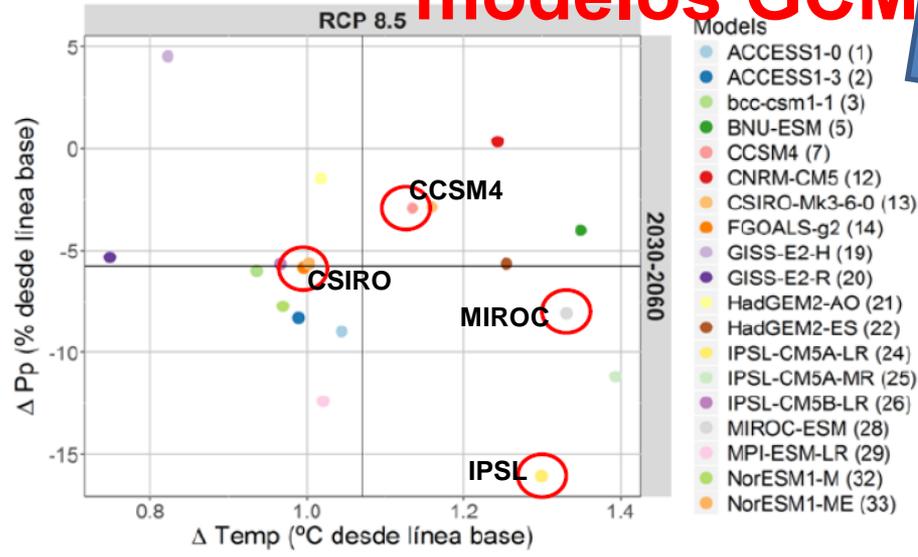


# Criterios de Selección de GCM (DGA, 2017)

## 1 Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática



¿Podemos usar directamente los modelos GCM "crudos"?



## 2 Sensibilidad climática

## 3 Cambios regionales

# Escalamiento y Corrección de Sesgo

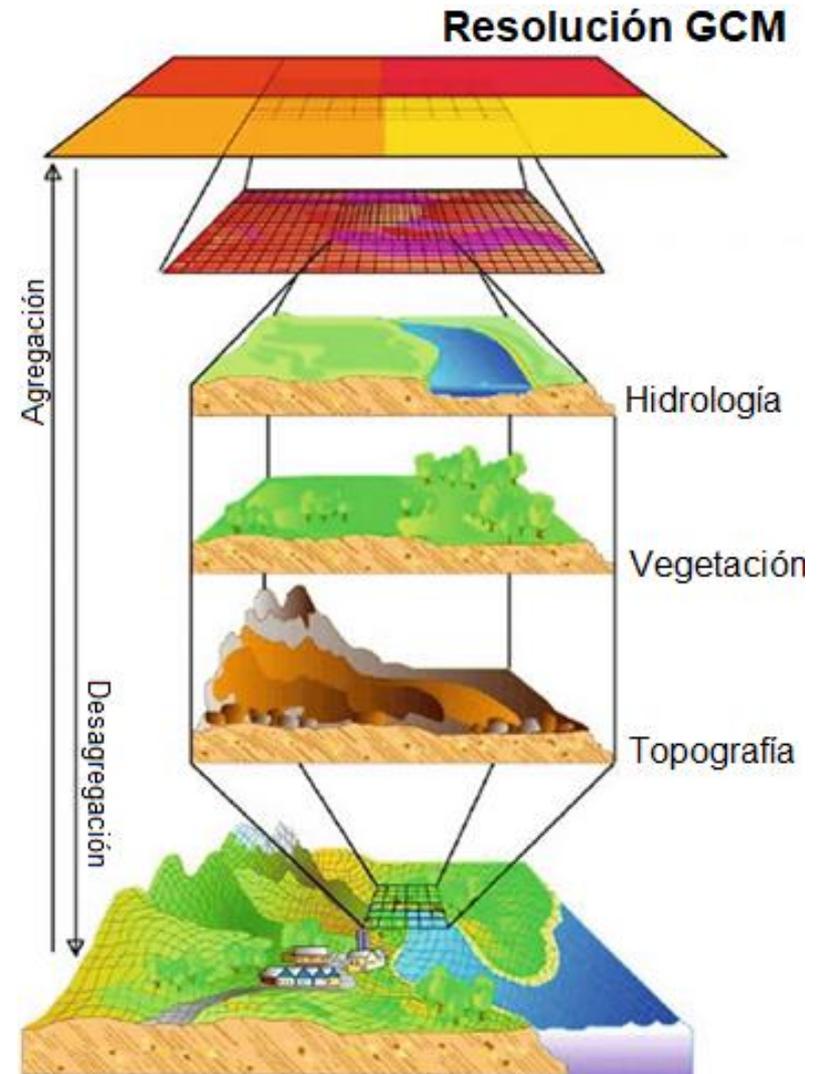
“Las proyecciones de cambio climático se basan en GCMs que se modelan a escala global. Sin embargo, para evaluar efectos sobre los sistemas hidrológicos, se requiere de información a nivel regional...” (DGA, 2019)

## 1 Escalamiento Dinámico

- Se basa en anidar un **modelo climático regional** (RCM, *Regional Climate Model*) de mayor resolución (e.g., grilla horizontal de 20-50 km) dentro de un GCM de menor resolución.

## 2 Escalamiento Estadístico

- Se basan en el supuesto de establecer **relaciones estadísticas entre la información de los GCM y los datos observados**, tanto entre ellos como entre los distintos periodos de tiempo a analizar (Wilby et al., 1998).

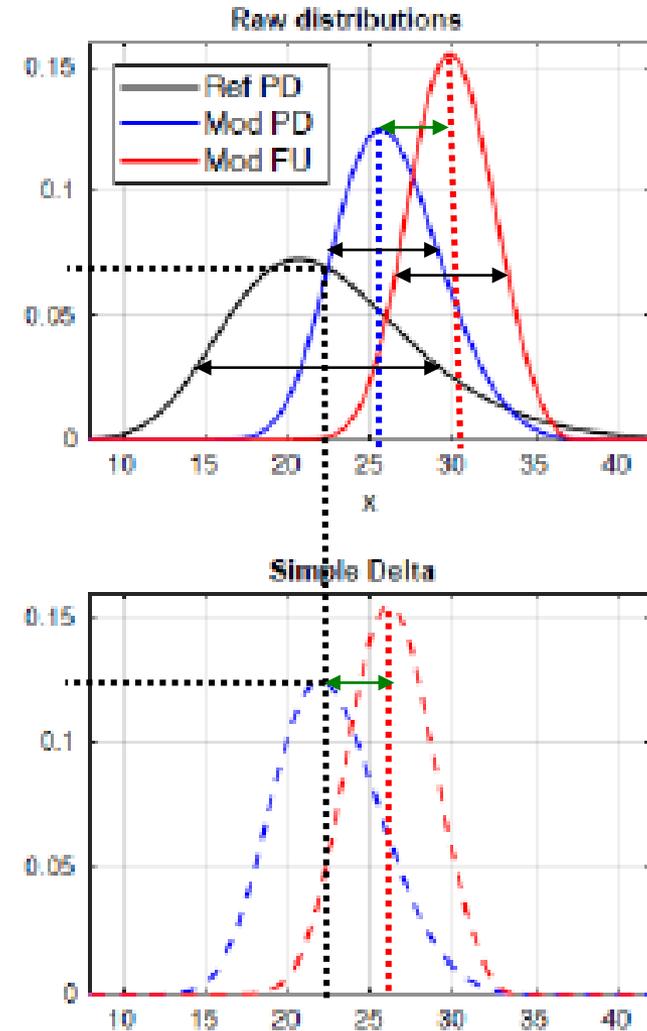


# Escalamiento y Corrección de Sesgo

“Ni los datos escalados de forma estadística ni de forma dinámica son capaces de ingresar como variables de entrada a un modelo hidrológico sin un paso previo de corrección de errores temporales” (e.g., Wood et al., 2004; Ayala et al., 2011).

## 1 Método Delta

- Se introducen cambios en una variable de referencia, siguiendo las proyecciones de un GCM.
- **No considera cambios temporales en otros aspectos de la distribución de frecuencia de la variable evaluada, como su varianza o extremos**



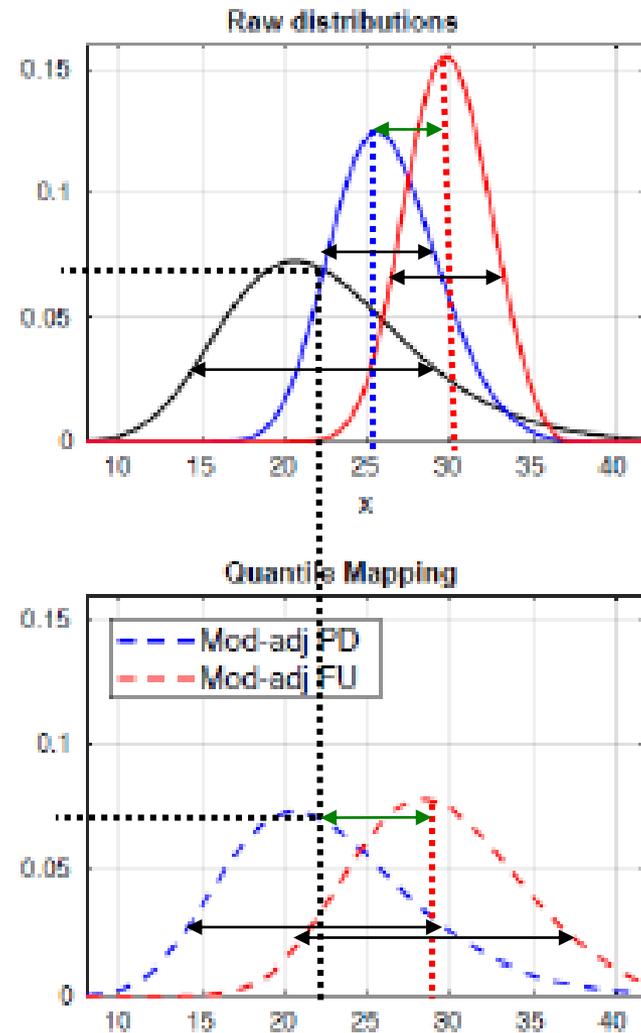
# Escalamiento y Corrección de Sesgo

“Ni los datos escalados de forma estadística ni de forma dinámica son capaces de ingresar como variables de entrada a un modelo hidrológico sin un paso previo de corrección de errores temporales” (e.g., Wood et al., 2004; Ayala et al., 2011).

## 1 Método Delta

## 2 Quantile Mapping (QM)

- Considera cambios temporales en los cuantiles de la distribución de probabilidad de la variable evaluada (cambios en un periodo consistente).
- Es efectiva removiendo sesgos relativos a observaciones, pero tiene el problema de amplificar o atenuar –en algunos casos de manera sustantiva– los cambios en el tiempo simulados por el GCM



# Escalamiento y Corrección de Sesgo

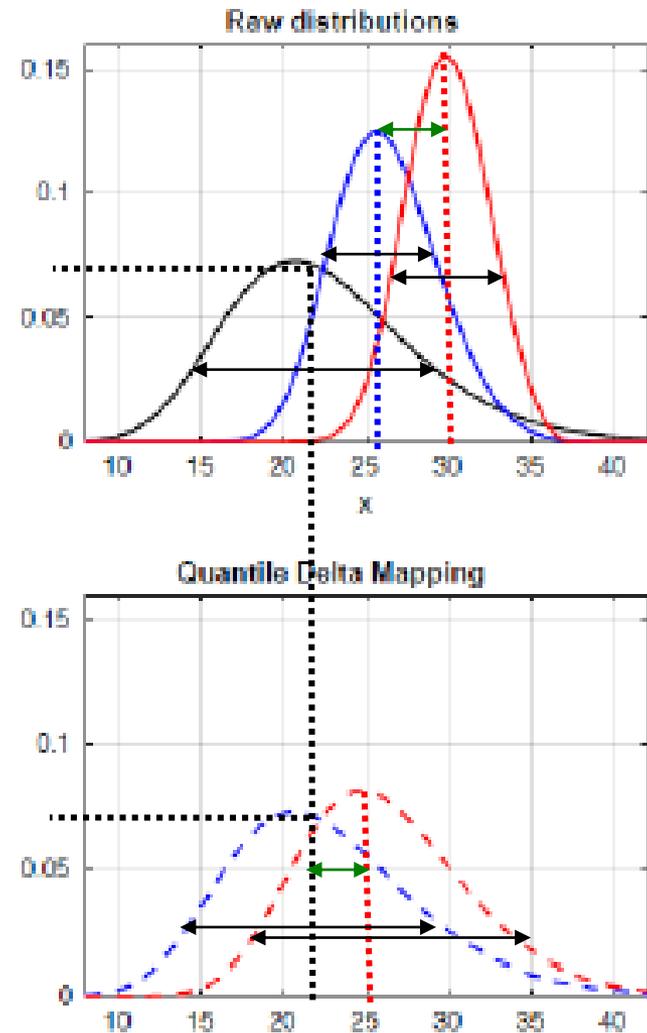
“Ni los datos escalados de forma estadística ni de forma dinámica son capaces de ingresar como variables de entrada a un modelo hidrológico sin un paso previo de corrección de errores temporales” (e.g., Wood et al., 2004; Ayala et al., 2011).

## 1 Método Delta

## 2 Quantile Mapping (QM)

## 3 Quantile Delta Mapping (QDM)

- Propuesta en Cannon *et al.* (2016), **preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para temperatura) o relativos (e.g., precipitación) en los cuantiles**, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia.



# Proyecto SIG

- **Ráster:** matrices que almacenan información espacial georreferenciada de una variable numérica del territorio, por ejemplo, la temperatura media.

- **Netcdf:** formato utilizado para comprimir grandes volúmenes de información. Contienen la información mensualizada de las forzantes meteorológicas y las variables obtenidas del modelo VIC.

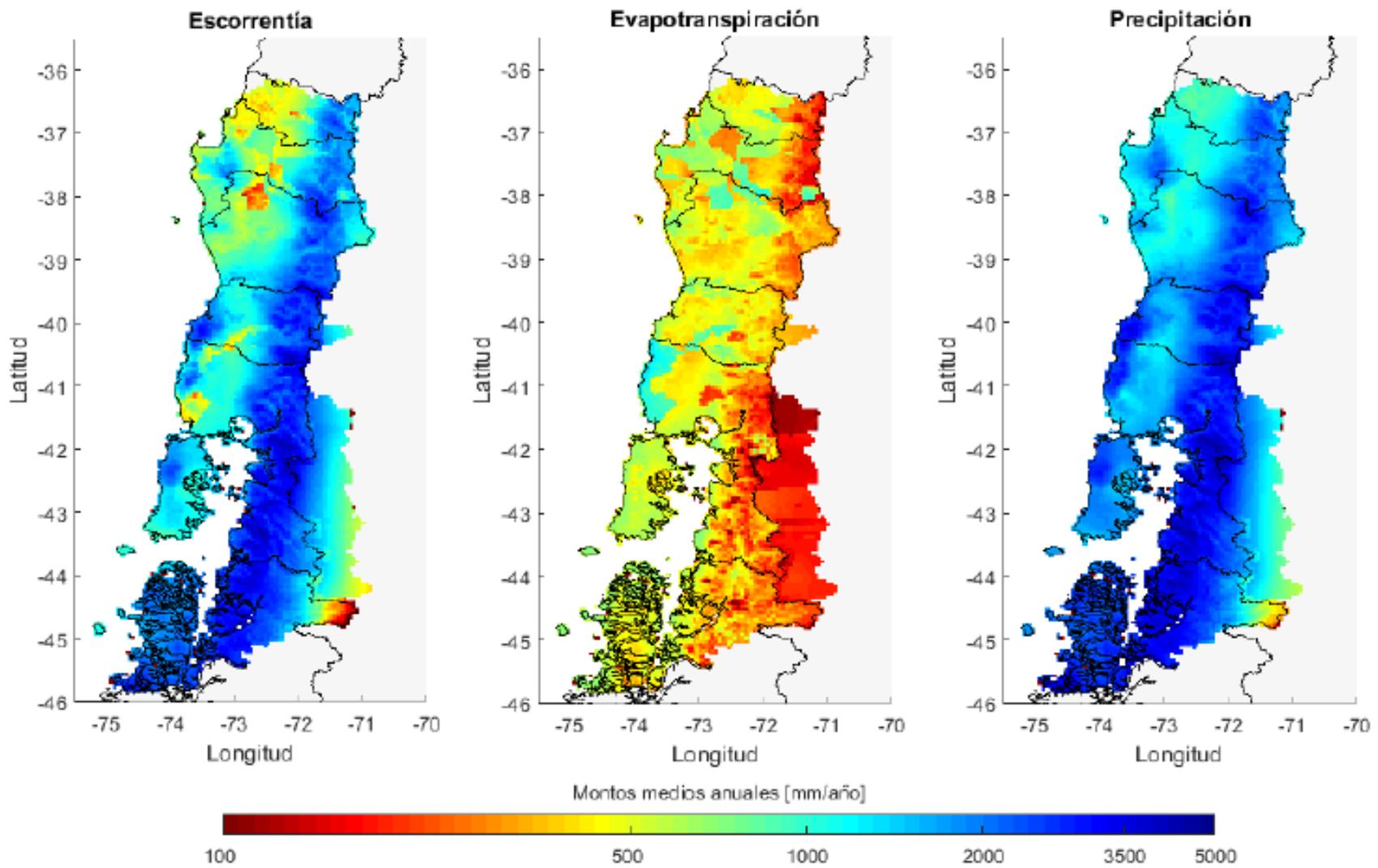
## Forzantes Meteorológicas

- **Temperatura media**
- **Temperatura mínima**
- **Temperatura máxima**
- **Precipitación acumulada**
- **Humedad relativa**
- **Velocidad de viento**

## Resultados VIC

- **ET:** evapotranspiración natural
- **fsca:** *Fractional Snow Covered Area*, fracción de área cubierta por nieve
- **Escorrentía (Runoff).**
- **Recarga**
- **Riego:** Riego mensual
- **SM:** *Soil moisture*. Suma del agua en las 3 capas de suelo.
- **SWE:** Snow Water Equivalent.

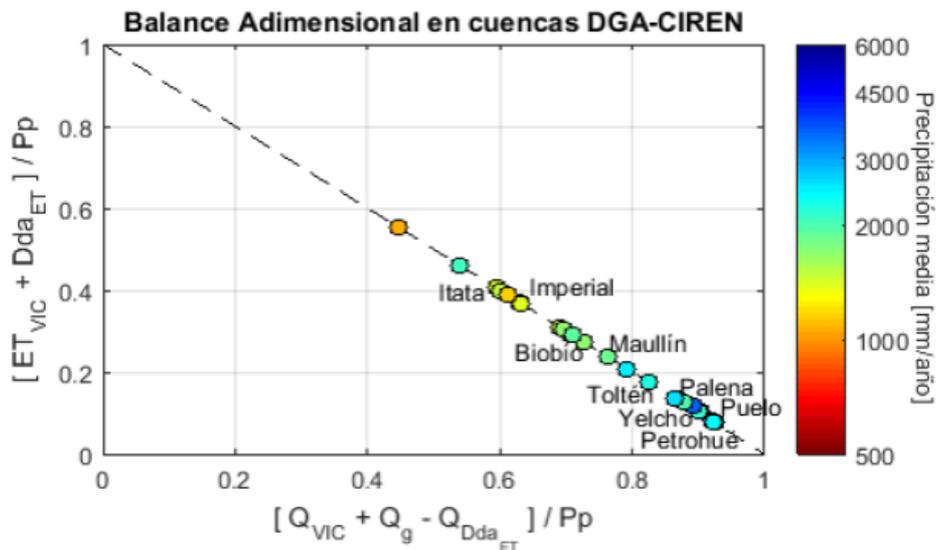
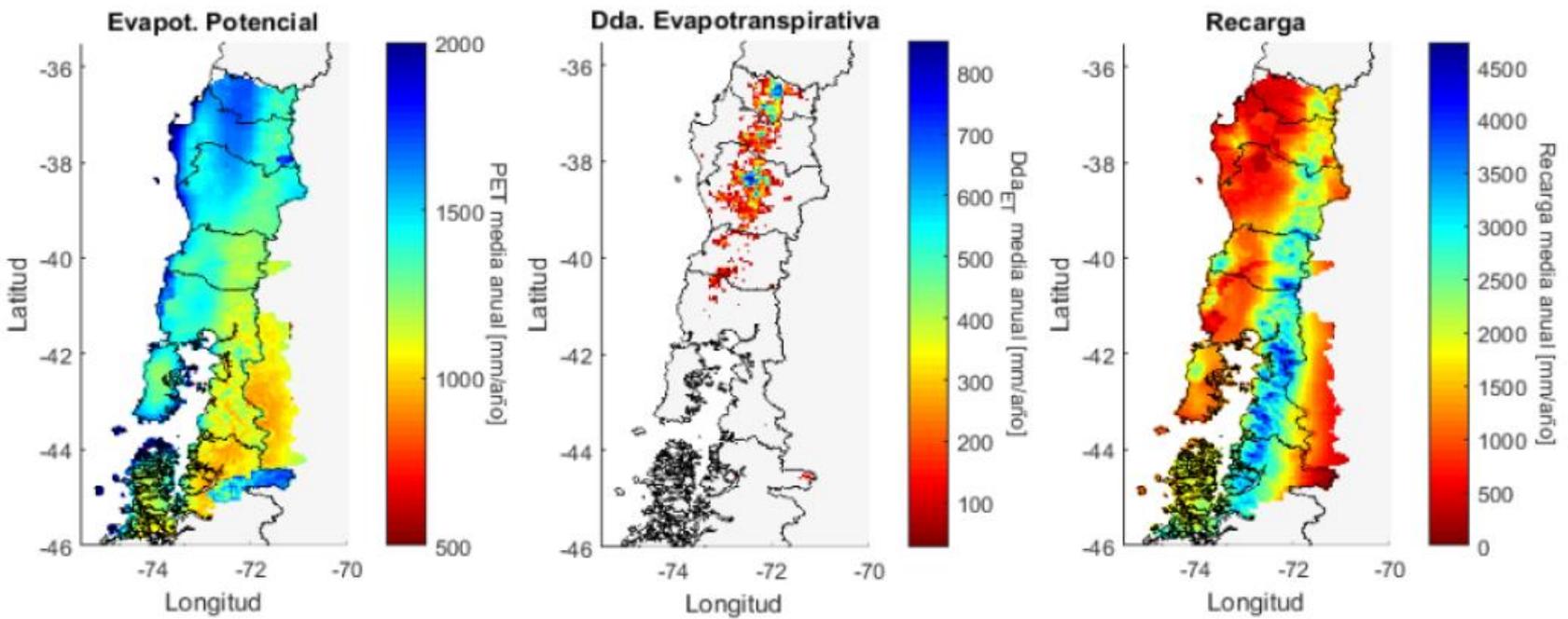
# Resultados Periodo Histórico 1985-2015



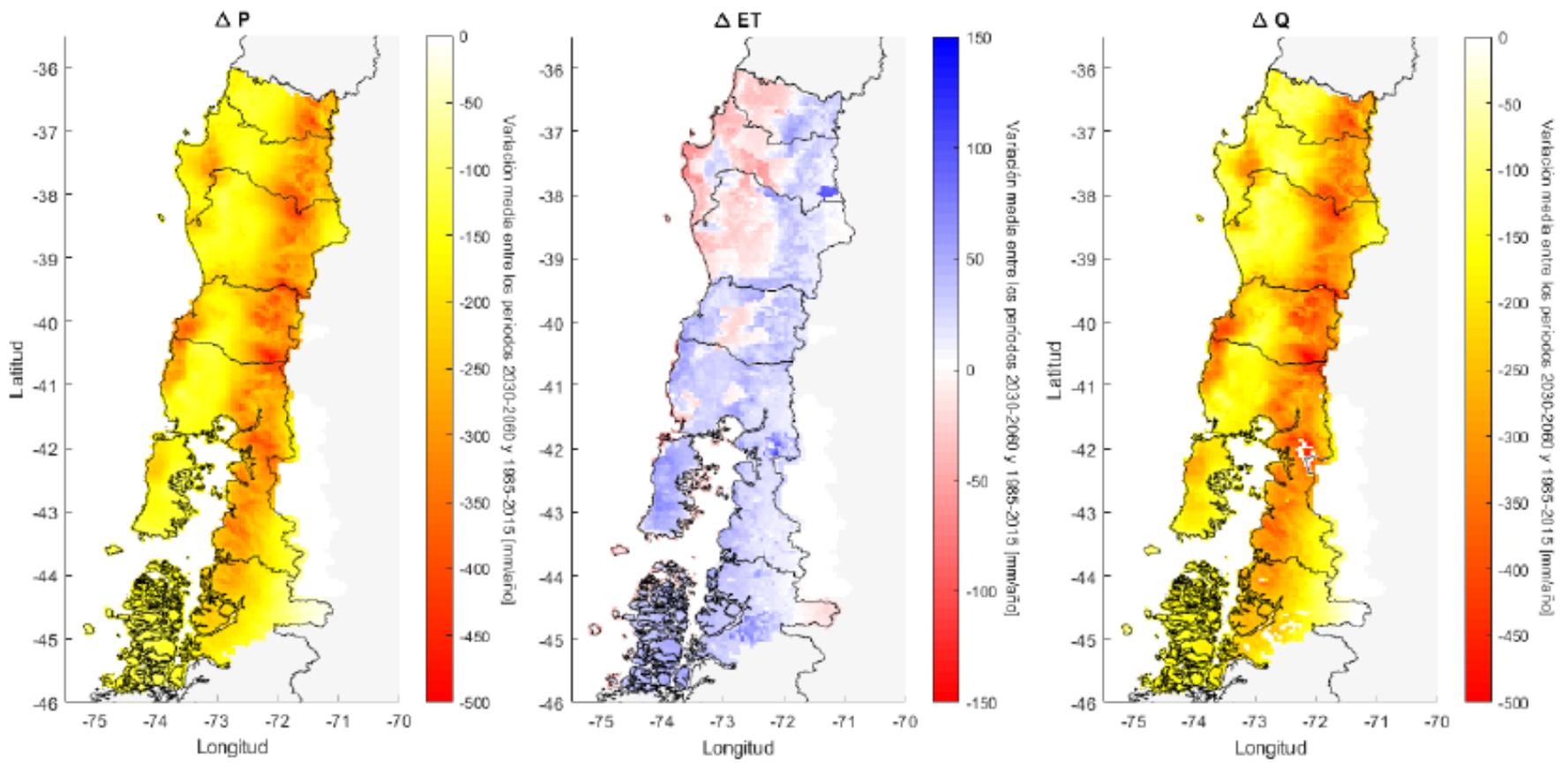
# Resultados Periodo Histórico 1985-2015

DARH	Nombre	P	Q	ET	Riego	Glaciar	Recarga	ETP (VIC)	ETP (Hargreaves)	T	Error
		mm/año								[°C]	[%]
800	Cuencas Costeras entre límite región y río Itata	1024,9	488,8	536,5	0	0	487,7	1686,3	1279,5	12,2	0,0%
801	Río Itata	1413,4	969,8	444,6	130,3	0,4	966,7	1563,9	1321,1	11,9	-0,1%
802	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Biobío	1060,8	473,3	588,5	0,0	0,0	472,7	1616,2	1310,6	12,7	-0,1%
803	Río Biobío	1709,9	1277,3	435,0	35,1	1,6	1269,2	1498,1	1234,8	10,2	-0,2%
804	Arauco	1637,2	1030,8	608,7	0,5	0,0	1027,7	1612,7	1245,8	11,9	-0,1%
805	Costeras entre Punta Lavapié y Río Lebu	1537,9	1062,3	477,1	0,2	0,0	1058,5	1766,0	1224,9	11,8	-0,1%
806	Costeras entre Lebu y Tirúa	1382,3	874,9	508,9	0,6	0,0	872,5	1593,9	1223,4	11,7	-0,1%
900	Río Imperial	1561,8	1091,1	472,6	135,6	0,7	1089,0	1463,9	1233,7	11,1	-0,2%
901	Cuencas Costeras entre límite Región y Río Imperial	1493,6	897,6	597,2	0,0	0,0	895,4	1738,9	1177,3	11,4	-0,1%
902	Cuencas Costeras entre Río Imperial y Río Toltén	1156,5	721,4	435,9	12,7	0,0	720,1	1639,4	1221,7	12,0	-0,1%
903	Río Toltén	2260,5	1888,9	374,3	26,4	5,1	1883,2	1347,5	1210,3	9,8	-0,3%
904	Río Queule	1718,4	1217,1	501,8	0,0	0,0	1215,3	1456,7	1193,4	11,2	0,0%
1400	Cuencas Costeras Los Ríos Norte	1864,3	1275,3	589,2	2,1	0,0	1272,8	1435,6	1177,7	11,0	0,0%
1401	Río Valdivia	2279,7	1828,9	451,7	14,0	1,8	1822,5	1292,6	1161,8	10,0	0,0%
1402	Cuencas Costeras entre Río Valdivia y Río Bueno	2995,6	2450,2	544,5	0,0	0,0	2446,3	1473,9	1140,3	10,3	0,0%
1403	Río Bueno	2198,6	1723,8	475,9	10,7	0,5	1717,6	1311,9	1162,1	10,2	-0,1%
1000	Cuencas Costeras entre Río Bueno y Río Maullín	2026,7	1090,6	935,7	0,0	0,0	1086,3	1508,3	1126,4	10,4	0,0%
1001	Río Maullín	1855,0	1417,4	437,2	0,2	0,6	1416,0	1368,4	1110,7	10,7	0,0%
1002	Cuencas Costeras e Islas entre Río Maullín y Río Chamiza	1679,8	1168,6	510,8	0,0	0,0	1167,4	1480,8	1092,5	10,9	0,0%
1003	Cuencas Costeras entre Río Chamiza y Río Petrohué	2938,2	2544,1	394,4	0,0	0,4	2541,3	1205,9	1114,3	8,9	0,0%
1004	Río Petrohué y Lago Todos Los Santos	2921,1	2676,7	245,2	0,0	11,4	2672,8	1166,9	1116,4	7,6	-0,4%
1005	Cuencas Costeras entre Río Petrohué y Río Puelo	3024,3	2794,9	229,8	0,0	2,5	2791,6	1124,1	1107,9	7,3	-0,1%
1006	Río Puelo	2372,9	2179,0	183,9	0,0	12,6	2171,2	1112,2	961,6	6,2	-0,1%

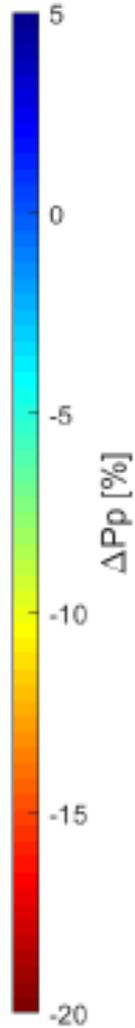
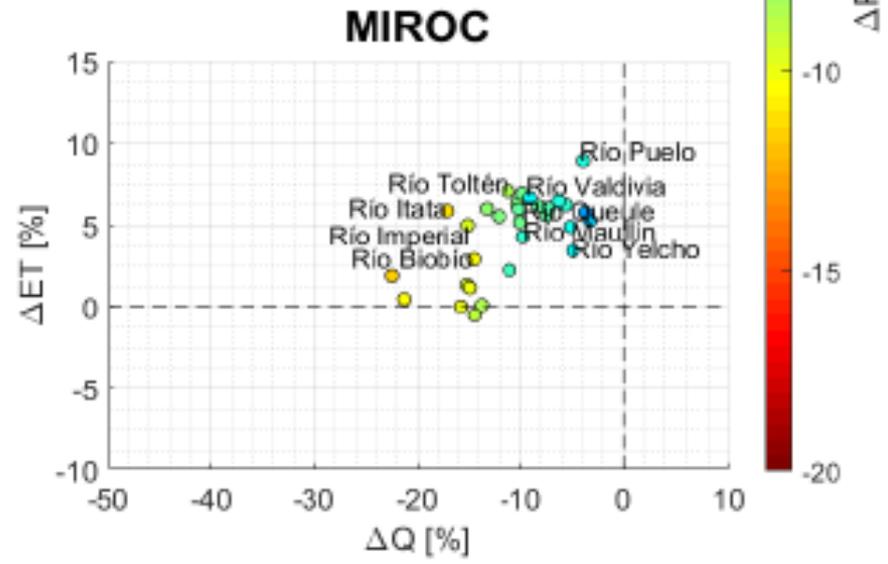
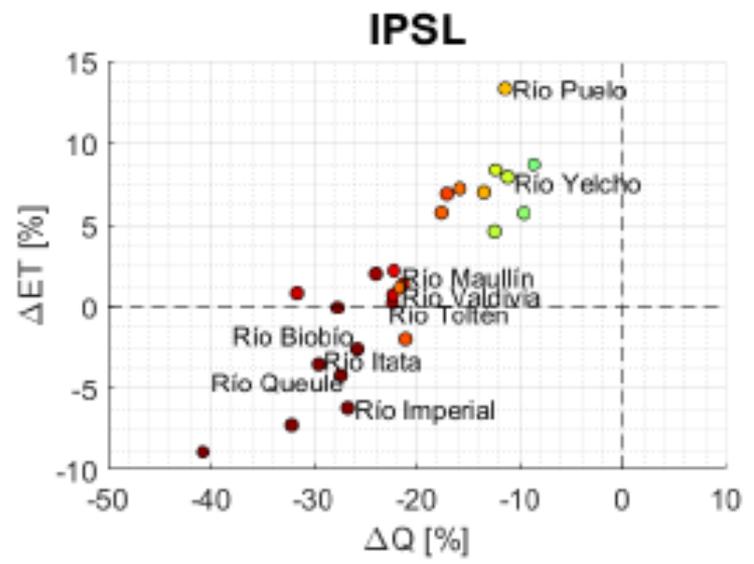
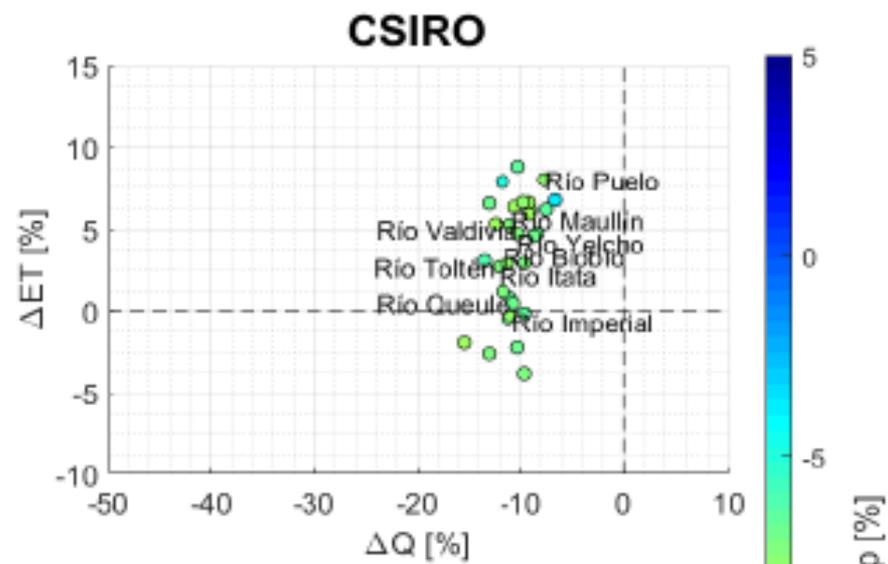
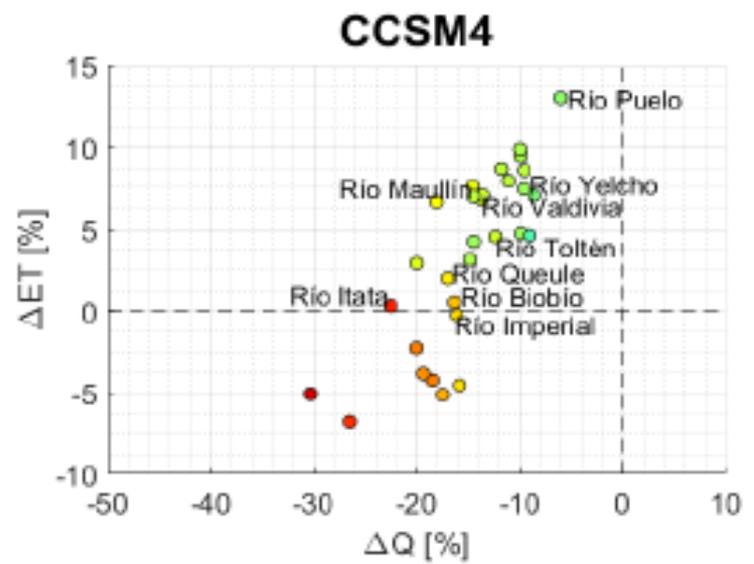
# Resultados Periodo Histórico 1985-2015



# Resultados Periodo Futuro 2030-2060

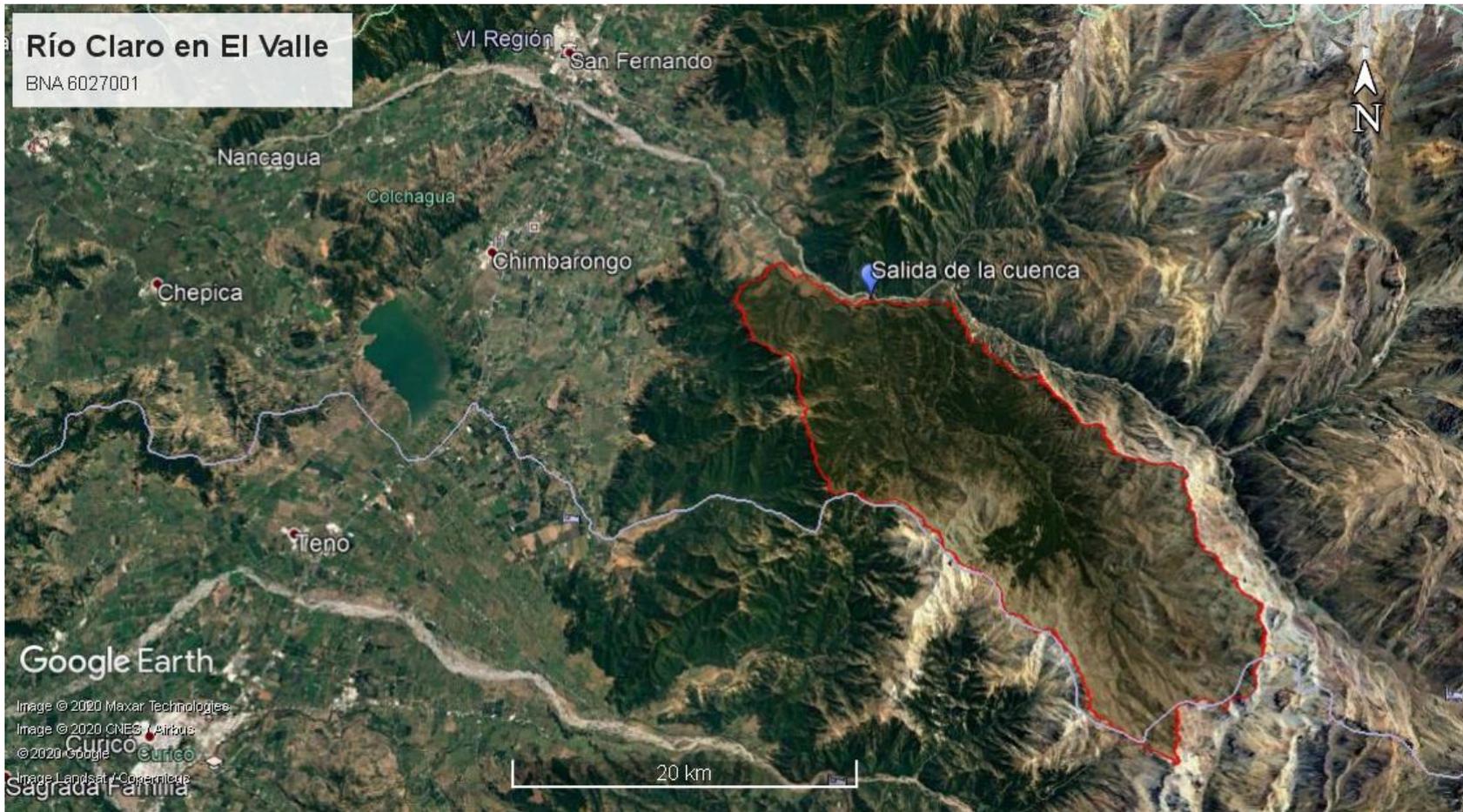


# Resultados Periodo Futuro 2030-2060

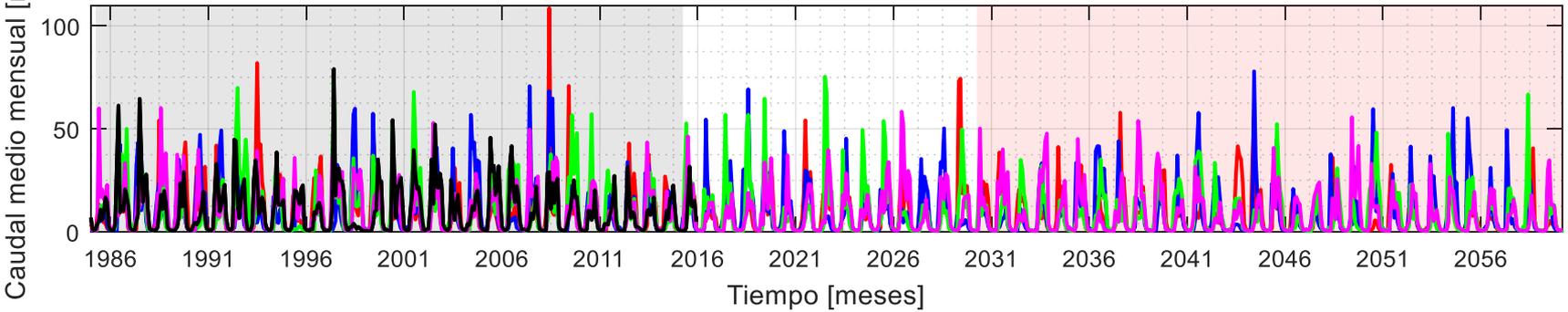
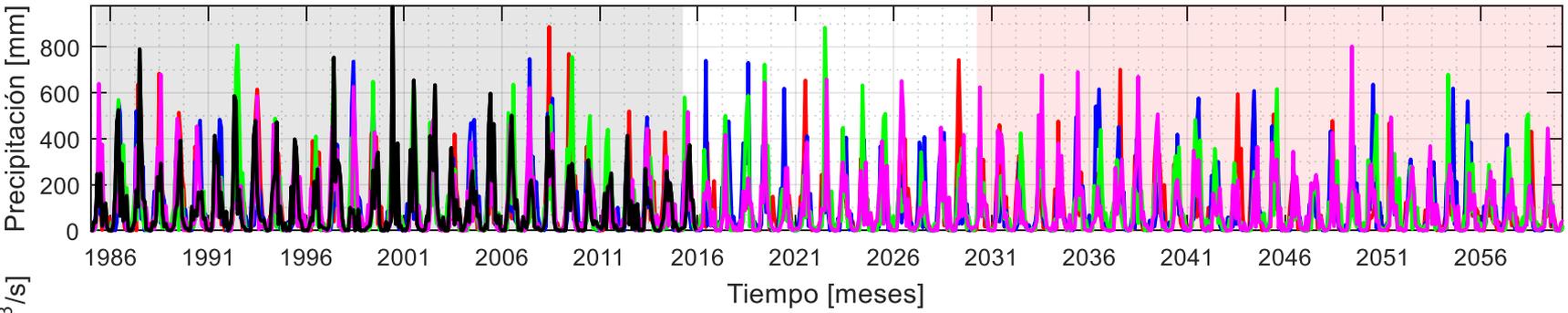
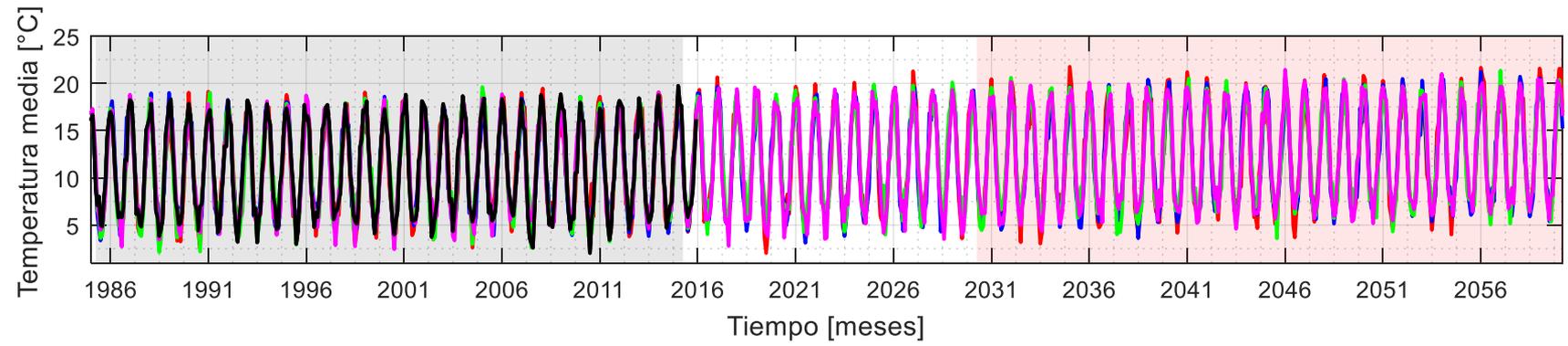


# Ejemplo de Aplicación

**Objetivo del ejercicio:** Estimar disponibilidad hídrica presente (1985-2015) y proyecciones de cambio climático en escenario RCP8.5 a partir de los modelos CCSM4, MIROC, IPSL y CSIRO.



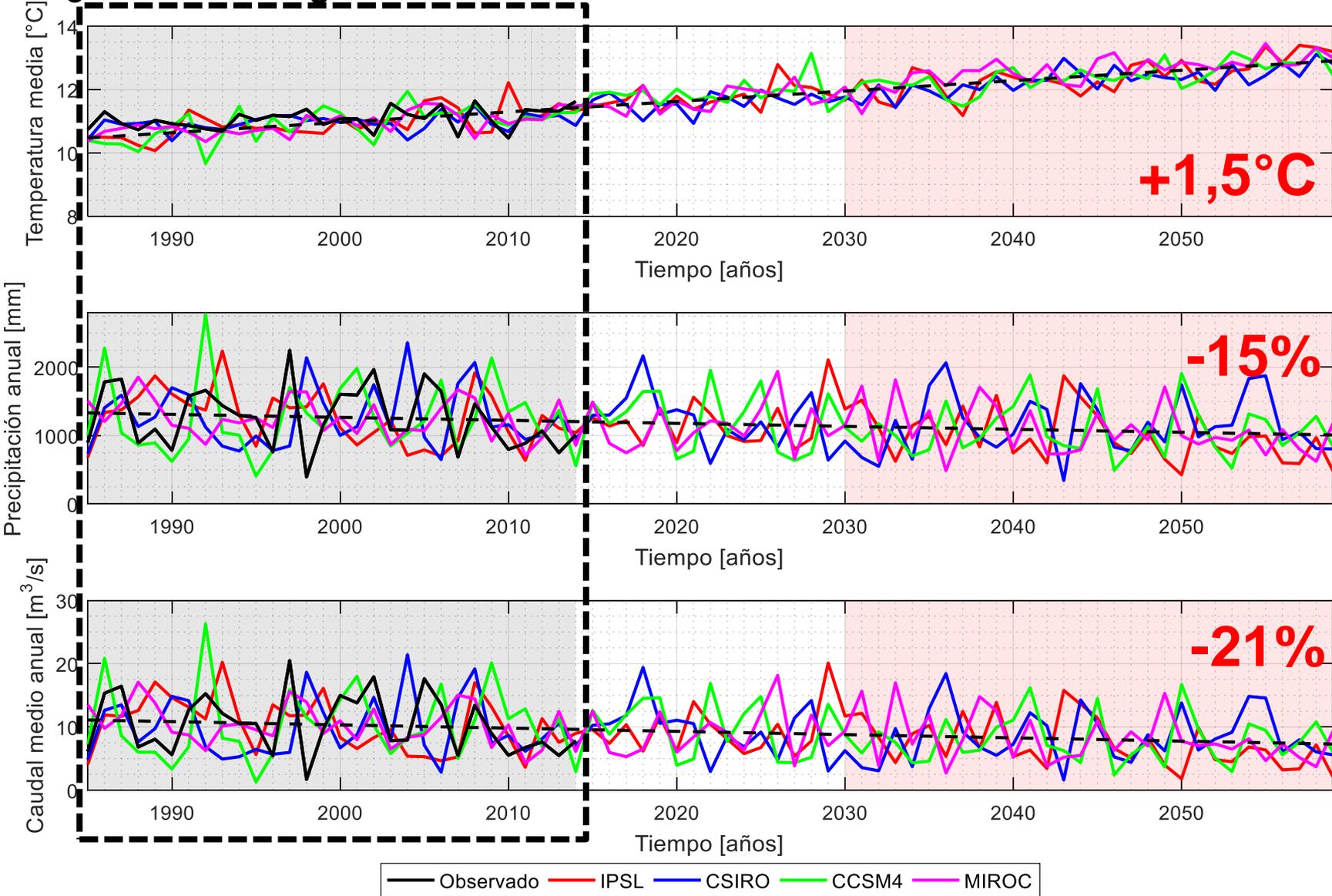
# Ejemplo de Aplicación



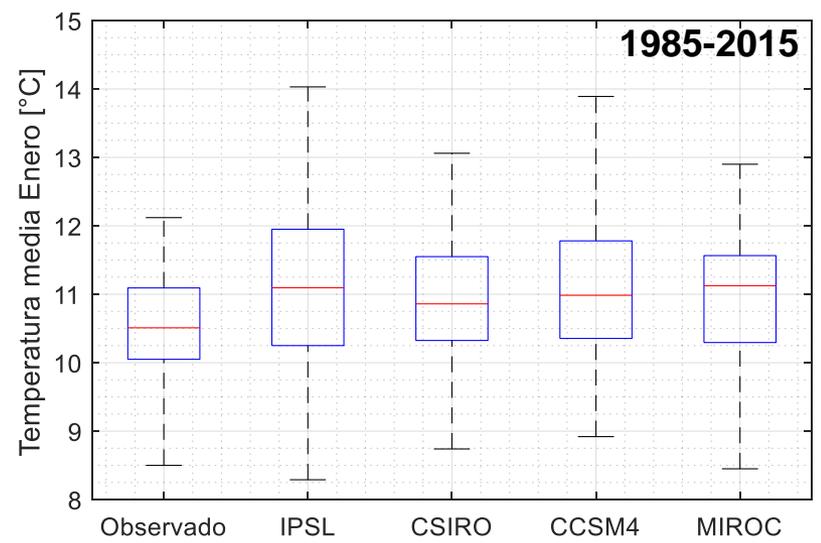
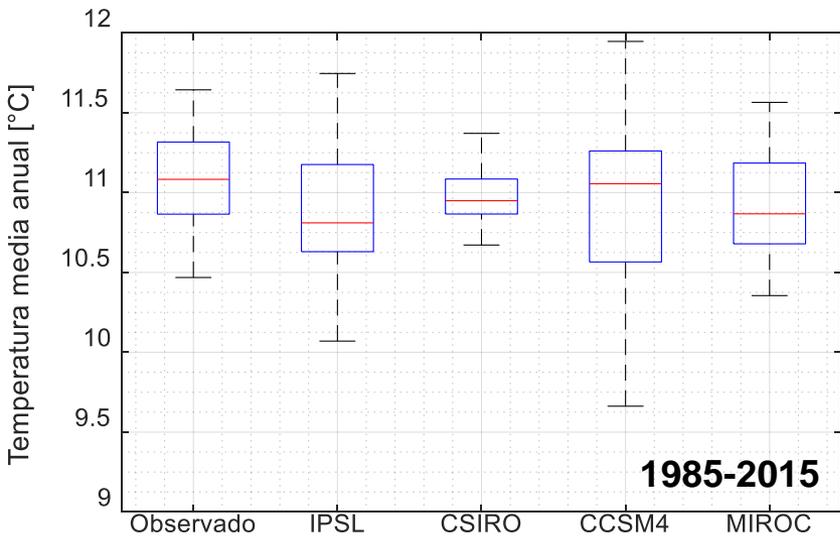
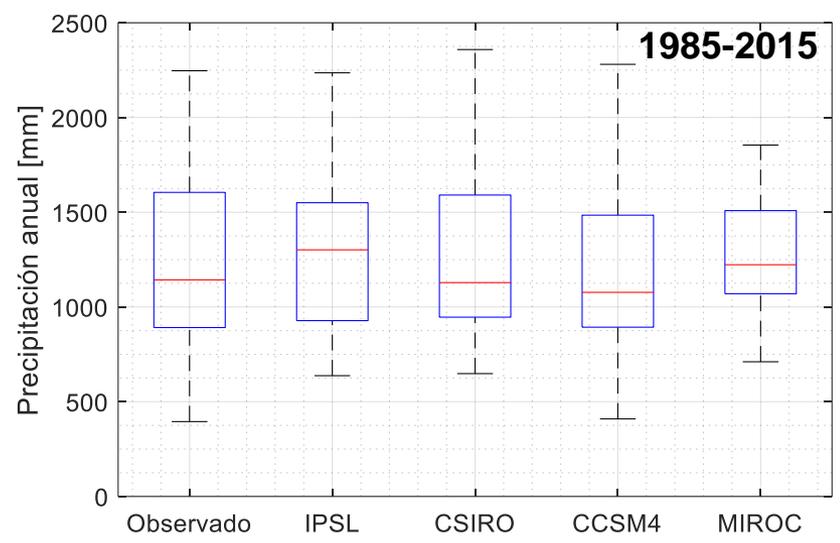
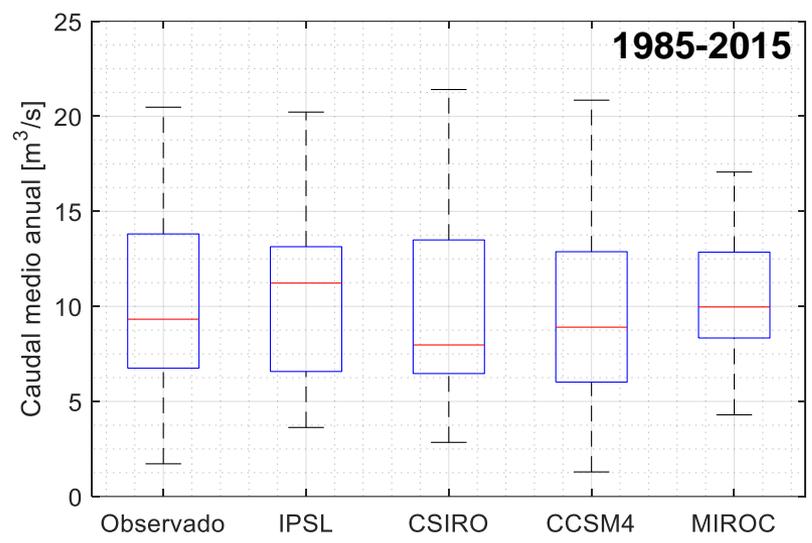
— Observado — IPSL — CSIRO — CCSM4 — MIROC

# Ejemplo de Aplicación

¿Debiesen ser iguales las series?



# ¿Periodo Histórico debiese ser igual?



# Limitaciones

- Los resultados obtenidos corresponden a una estimación del escurrimiento en **régimen natural**.
- Las simulaciones **NO consideran cambios en los parámetros** representativos de las propiedades físicas de las cuencas.
- El **uso de suelo**, tanto en el periodo histórico como futuro, **se supone constante**.
- Las **simulaciones sólo dan cuenta de la incertidumbre asociada a las forzantes climáticas**.

# Comentarios y Conclusiones Finales

- **Avances considerables** en la caracterización del ciclo del agua en Chile, pero no suficientes...
- Cada etapa del proyecto de actualización del balance hídrico nacional ha conllevado un **aprendizaje**.
- Resulta de suma importancia la **homologación del proyecto** de Balance Hídrico, a fin de contar con un producto unificado en términos metodológicos.
- Aún quedan **muchos desafíos pendientes**: 1) estrategias de regionalización, 2) incorporación de ruteo, 3) implementación de otros modelos hidrológicos, 4) escenarios múltiples de uso de suelo presente y futura, etc.

**¿Debemos esperar 30 años más para seguir estudiando el ciclo del agua en Chile?**

# Gracias

A landscape photograph showing a dry, cracked lake bed in the foreground, a calm lake in the middle ground, and mountains in the background under a clear blue sky. The sun is bright in the upper right corner, creating a lens flare effect. The cracked earth in the foreground is a mix of brown and grey tones, with deep, irregular cracks. The lake in the middle ground is a dark blue-grey color, reflecting the sky. The mountains in the background are dark and silhouetted against the sky. The sky is a clear, bright blue with a few wispy clouds near the horizon.

## Agradecimientos

**Powered@NLHPC:** Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

# Cuencas en Régimen Natural

- 1 Suma de derechos consuntivos superficiales menor al 5% del caudal medio anual registrado en la estación fluviométrica que define la cuenca hidrográfica
- 2 No existan embalses dentro de la cuenca
- 3 Al menos cinco años de información fluviométrica

## Filtro N°1: Derechos Consuntivos

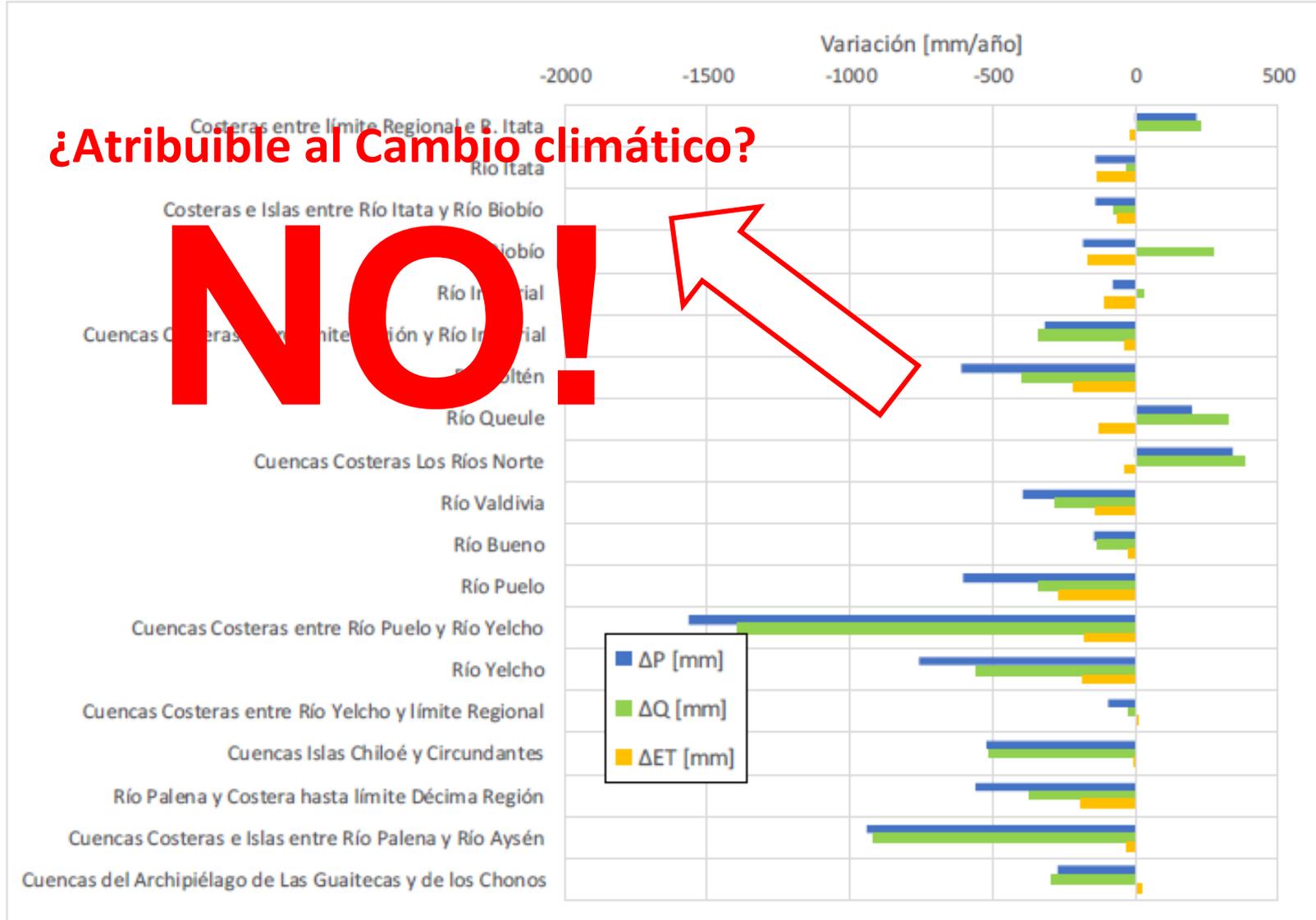
## Filtro N°2: Derechos No Consuntivos

- 1 Derechos no consuntivos asignados, pero que no se encuentran en ejercicio
- 2 Si existen bocatomas importantes, la restitución se encuentre aguas arriba de la estación fluviométrica que define la cuenca

# Comparación respecto a DGA (1987)

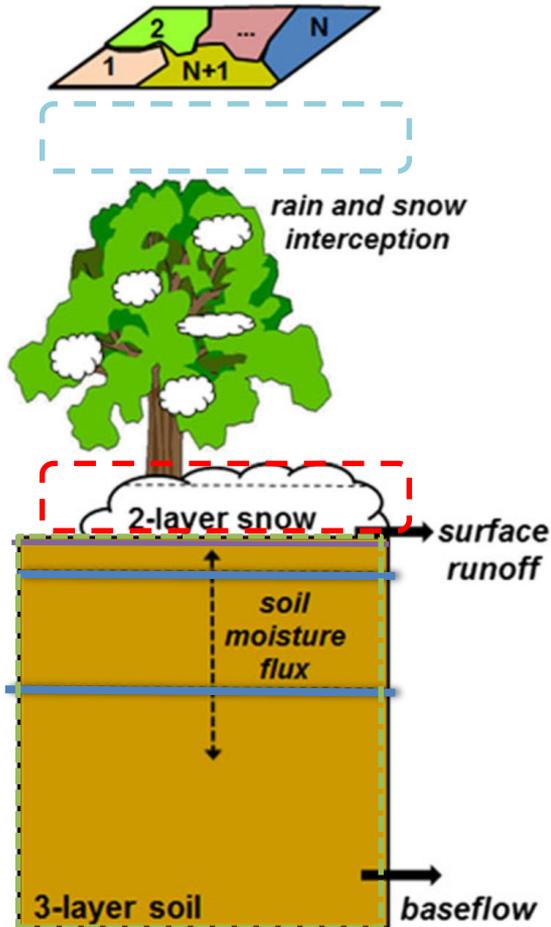
¿Atribuible al Cambio climático?

**NO!**



# Calibración individual

Mosaic representation of different vegetation coverages at each cell



## □ Algoritmo de calibración

- Shuffled Complex Evolution (SCE-UA, Duan et al. 1992).
- Función objetivo: eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Ajuste temporal

Ajuste en variabilidad

Ajuste en volumen

$$\alpha = \sigma_s / \sigma_o$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o$$

1 parámetro asociado a la temperatura a la cual puede llover/nevar

4 parámetros de nieve asociados al decaimiento del albedo y rugosidad de la nieve

4 parámetros asociados a la infiltración

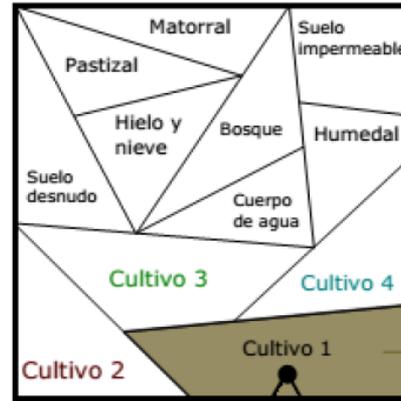
2 parámetros asociados al paso de agua de un estrato de suelo a otro

1 parámetro asociado a la profundidad de cada estrato (3 en total)

# Demanda de riego

Cálculo de extracciones por riego en base a ETP y ETR de VIC + régimen de riego de los cultivos

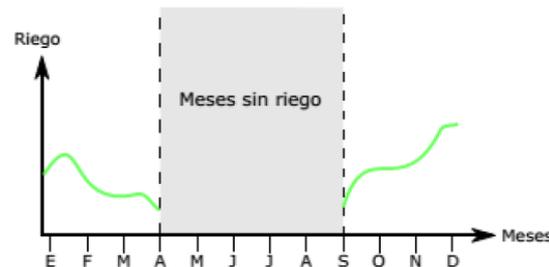
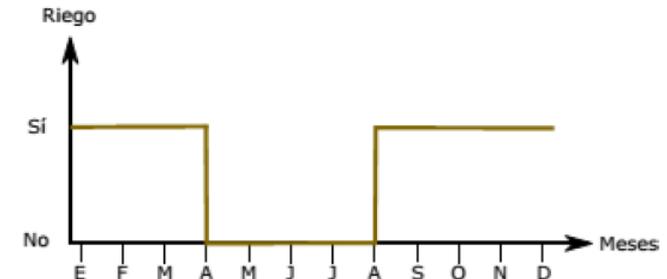
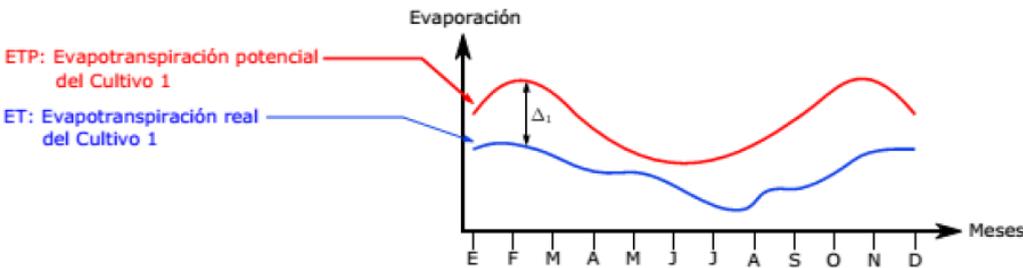
Distribución de coberturas vegetacionales en la celda



$A_1$  : Área del Cultivo 1  
 $\eta_1$  : Eficiencia de riego del Cultivo 1

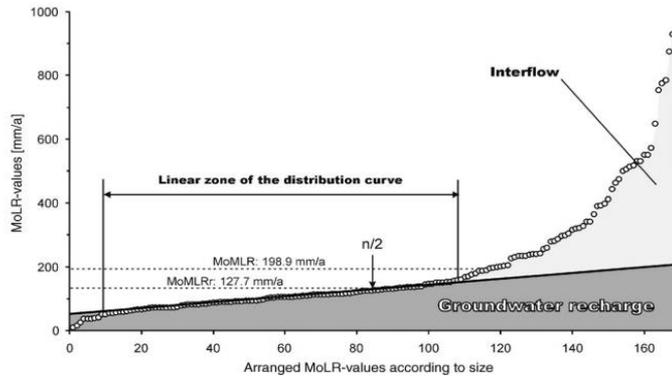
Resultados simulación en VIC

Régimen de riego del Cultivo 1



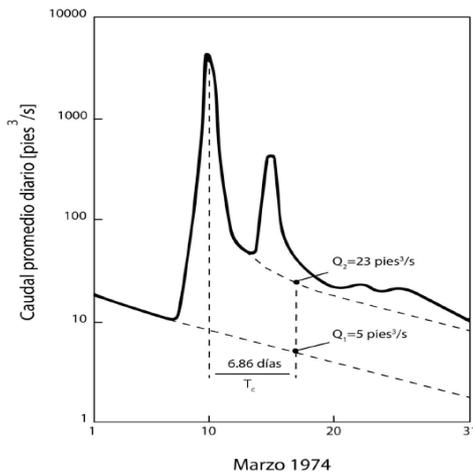
# Estimación de recarga

- MoMLR: Flujo mínimo mensual



$$\text{MoMLRr} = m \cdot \frac{n}{2} + y_0 \quad (\text{Demuth 1993})$$

- RORA: Peaks durante período de lluvia



Rutledge & Daniel (1994)

- Estimación basada en VIC

$$\frac{dSM_3}{dt} = \text{Recarga} - \text{baseflow}$$

