



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



Diseño hidrológico frente a eventos extremos debidos al Cambio Climático: Diseño hidrológico de puentes en la cuenca del Río Mataquito



Análisis de la Capacidad Nacional de Infraestructura Pública para Responder a los Eventos Extremos y las Medidas de Adaptación en el Contexto del Cambio Climático. 9 de enero, 2013

Jorge Gironás^{1,2}, Eleonora Demaría²

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental

²Centro Interdisciplinario de Cambio Global

Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad) y el diseño hidrológico de infraestructuras

TABLA 3.702.2.B
PERIODOS DE RETORNO PARA DISEÑO

Tipo de Obra	Tipo de Ruta	Período de Retorno (T, años)		Vida Util Supuesta (n; años)	Riesgo de Falla (%)	
		Diseño ⁽³⁾	Verificación ⁽⁴⁾		Diseño	Verificación
Puentes y Viaductos ⁽¹⁾	Carreteras	200	300	50	22	15
	Caminos	100	150	50	40	28
Alcantarillas (S>1,75 m²) o H terrap. ≥10 m y Estructuras Enterradas ⁽²⁾	Carreteras	100	150	50	40	28
	Caminos	50	100	30	45	26
Alcantarillas (S<1,75 m²)	Carreteras	50	100	50	64	40
	Caminos	25	50	30	71	45
Drenaje de la Plataforma	Carreteras	10	25	10	65	34
	Caminos	5	10	5	67	41
Defensas de Riberas	Carreteras	100	-	20	18	-
	Caminos	100	-	20	18	-

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

El riesgo r o probabilidad de falla es definido en función de la vida útil y del periodo de retorno del evento T

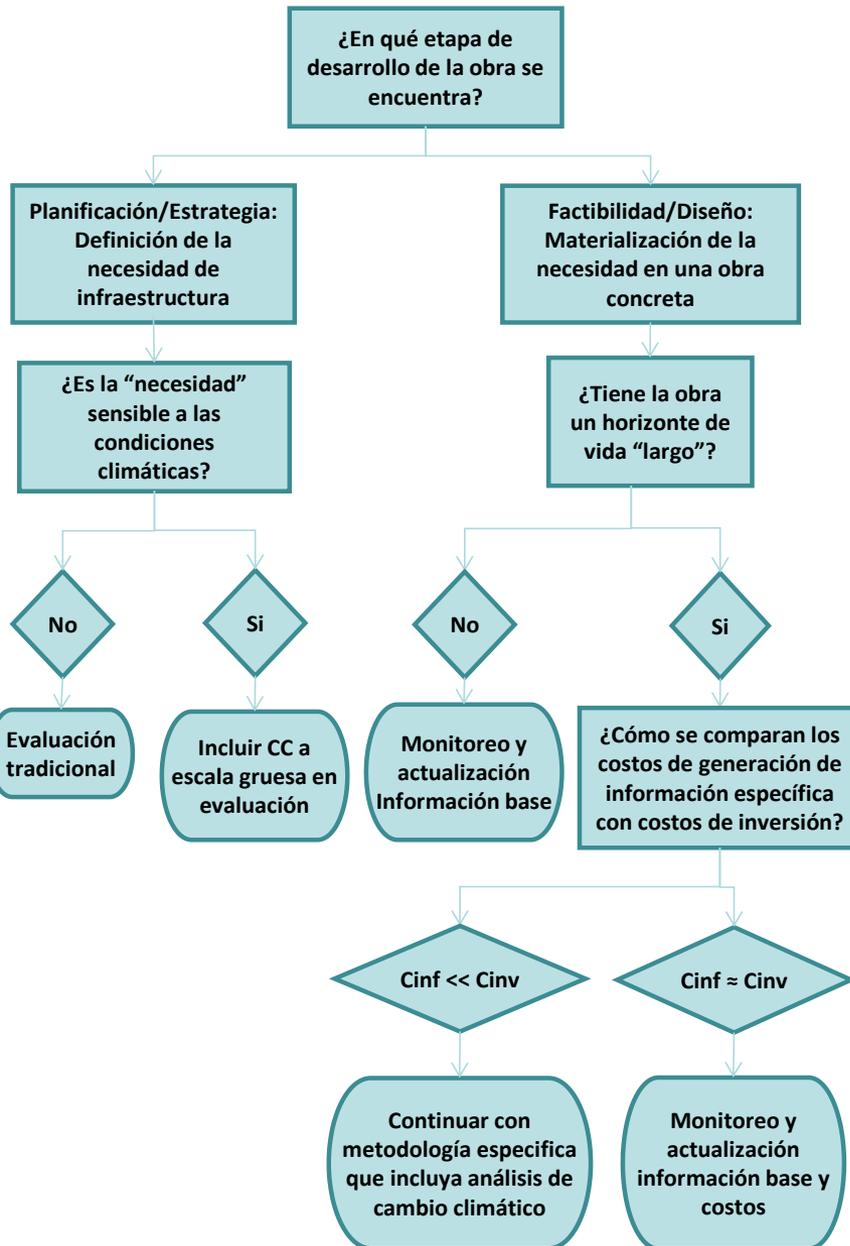
Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad) y el diseño hidrológico de infraestructuras

TABLA 3.702.2.A
PERIODO DE RETORNO Y RIESGO DE FALLA SEGUN VIDA UTIL

Riesgo (r, %)	Vida útil (n, años)			
	10	20	25	50
50	15	29	37	73
25	35	70	87	174
10	95	190	238	475
5	195	390	488	975
1	995	1.990	2.488	4.977

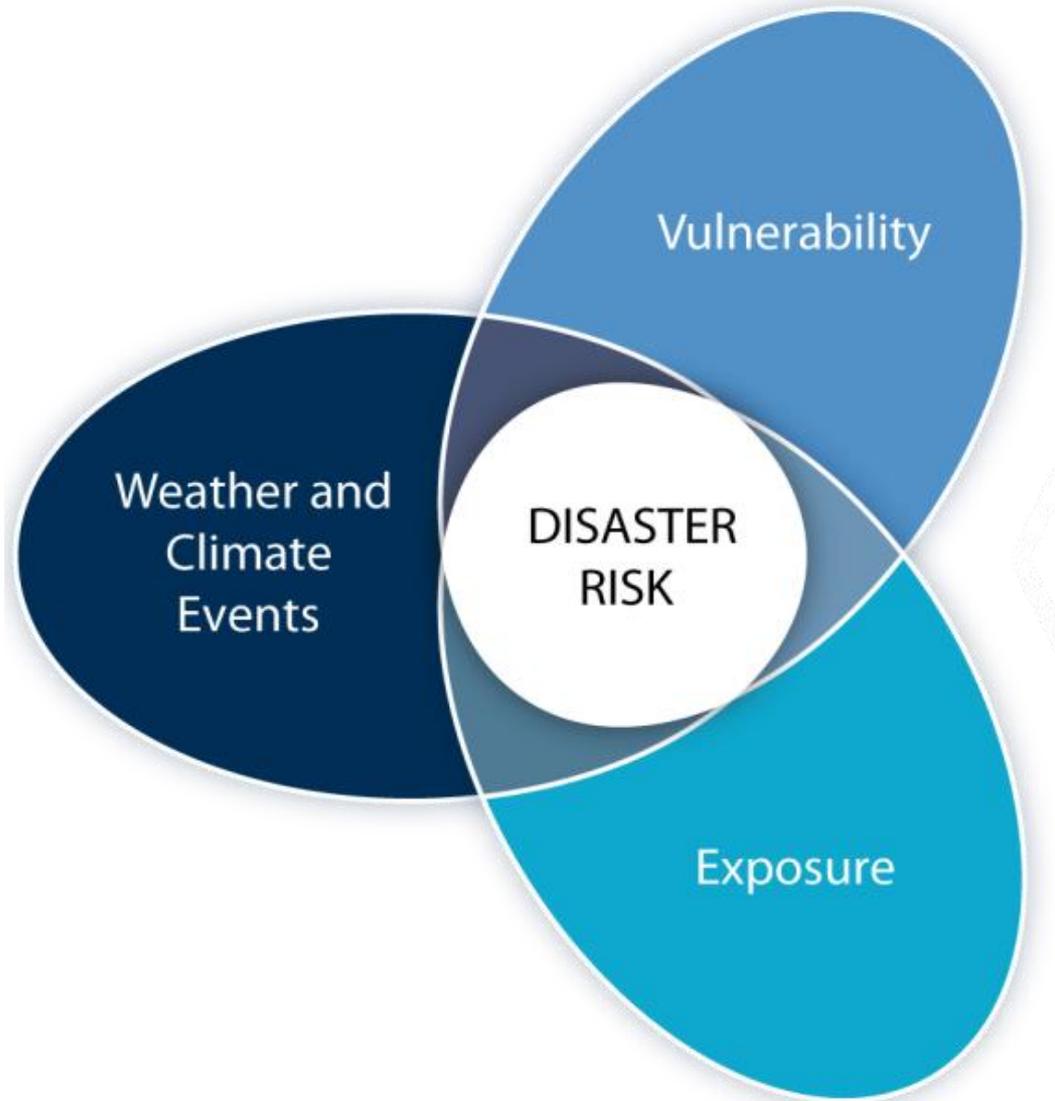
¿Es necesario incorporar la adaptación al cambio climático en la evaluación de infraestructura vial (puentes)?

Adaptación de la infraestructura al cambio climático



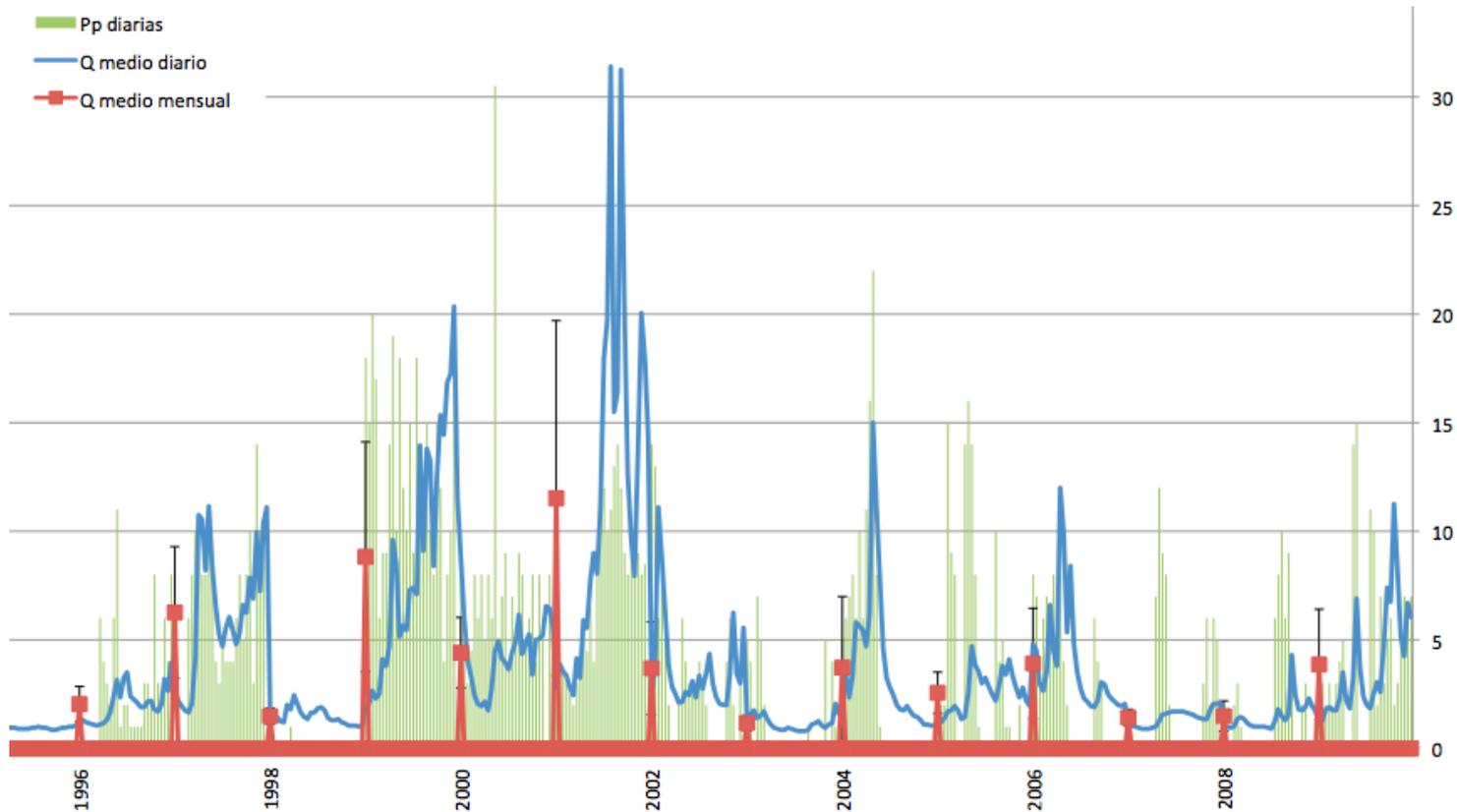
Estudio "Enfoque metodológico para evaluar la adaptación al cambio climático en la infraestructura pública del MOP"

Amenaza climática



Special IPCC Report on Extreme Events (SREX)

Amenaza climática



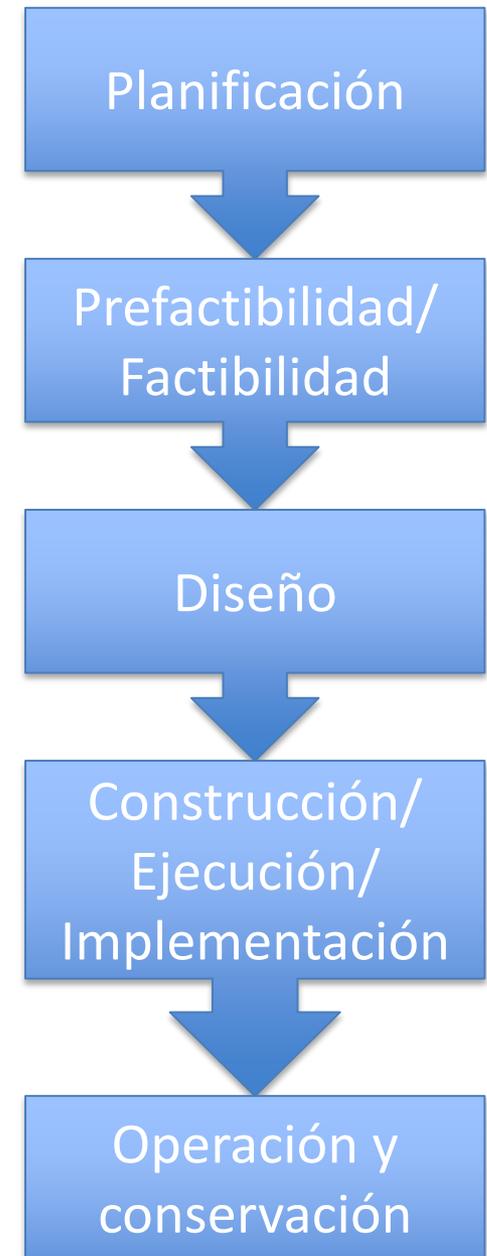
- Fenómenos climáticos presentan alta variabilidad espacial y temporal.
- La escala espacial y temporal es relevante y se vincula fuertemente con el problema de diseño e infraestructura.

Diseño en Ingeniería

“Proceso en el cual se aplican diversas técnicas, metodologías y principios científicos con objeto de definir una obra, dispositivo, proceso o sistema, encaminado a cubrir una cierta necesidad, con el suficiente detalle para permitir su realización”.

- a) Se satisface una necesidad.
- b) Existe un entorno e interacciones entre los componentes (i.e. un sistema).
- c) Existe un ciclo de vida.
- d) Hay restricciones físicas, económicas, sociales y funcionales.
- e) Actividad creativa y flexible.

Etapas del ciclo de vida de proyectos de infraestructura



Diseño en Ingeniería

- **Infraestructura:** Soporte material/físico para el desarrollo y correcto funcionamiento de actividades sectoriales y/o productivas y su funcionamiento (i.e. proveedoras de un servicio).
- **Ejemplos:** Transporte, telecomunicaciones, eléctrica, hidráulica.
- Generalmente asociadas a grandes inversiones, y significativos impactos sociales y ambientales.
- Ciclos de vida de proyectos implican una ganancia de experiencia que es formalizada en herramientas perdurables en el tiempo (Manual de Diseño).

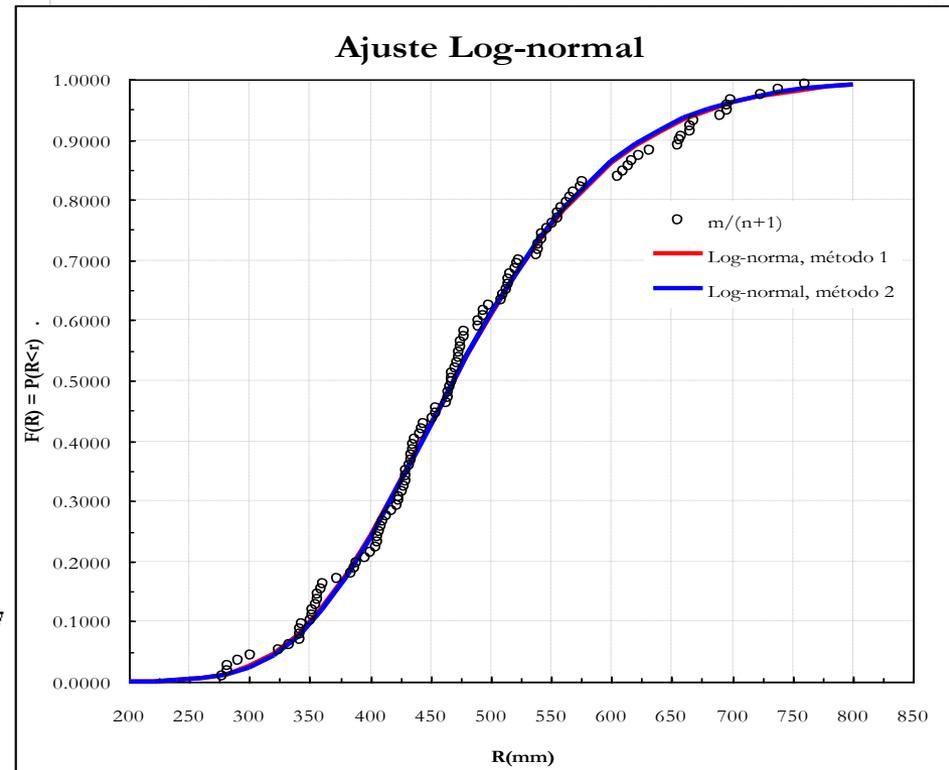
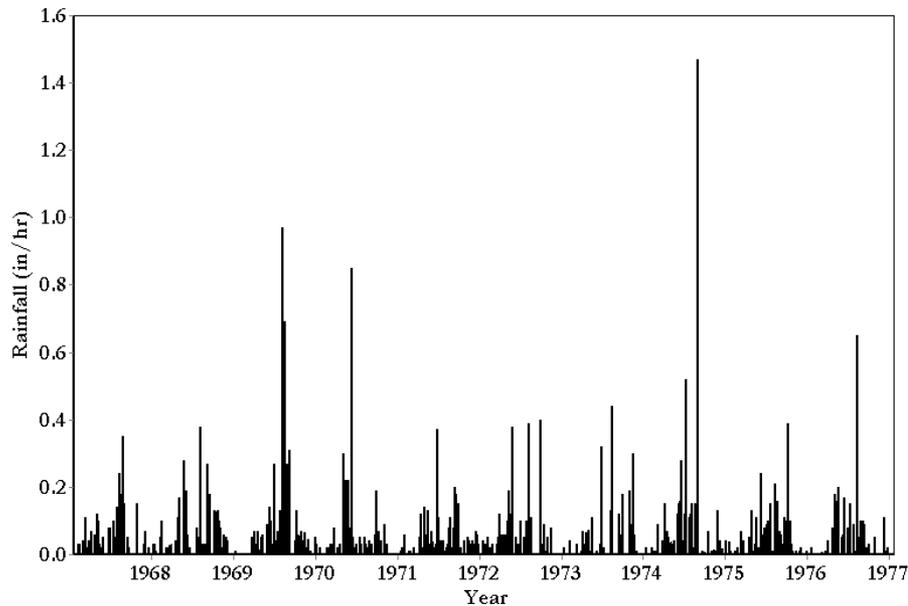


Diseño y amenaza climática

- La ingeniería constantemente enfrenta problemas de diseño en el contexto de incertidumbre.
- **Cambio climático:** El clima del futuro no es igual al clima del pasado.
 - Clima futuro pareciera ser más variable, con ocurrencia de eventos extremos, y distintas condiciones promedios.
 - Impacto sobre la efectividad de infraestructura e instalaciones influenciadas directa o indirectamente por condiciones meteorológicas.
 - Ejemplos de infraestructura sensible: Puentes, etc.
 - Robustez y flexibilidad como alternativas de enfoque en el diseño.

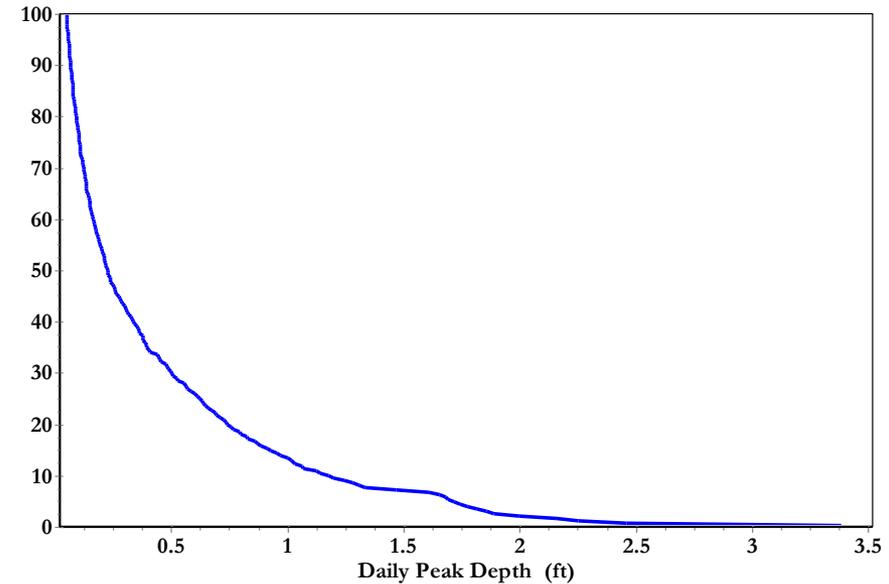
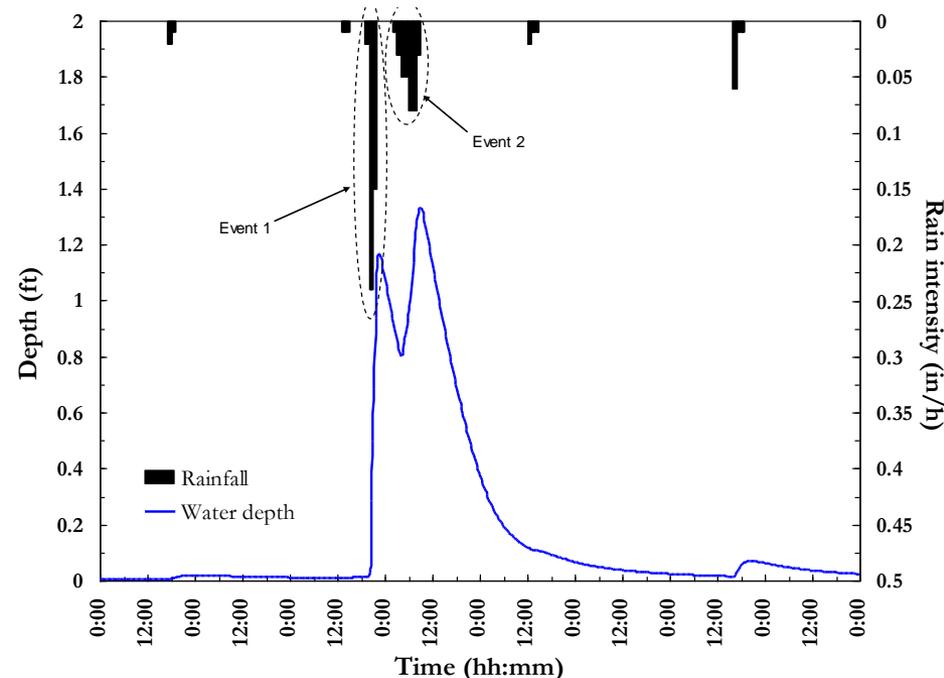
Caracterización de la amenaza climática en el diseño

- Variabilidad de la amenaza climática y sus características. **Enfoque actual:**
 - Variabilidad futura estimable a partir de condiciones históricas (fenómenos estacionarios).
 - Caracterización estadística que permite estimar periodos de retornos, magnitudes con ciertas probabilidad de ocurrencia, etc.



Caracterización de la amenaza climática en el diseño

- Variabilidad de la amenaza climática y sus características. **Enfoque actual:**
 - Generación de eventos sintéticos usados en el diseño.
 - Simulación continua y caracterización estadística de los resultados



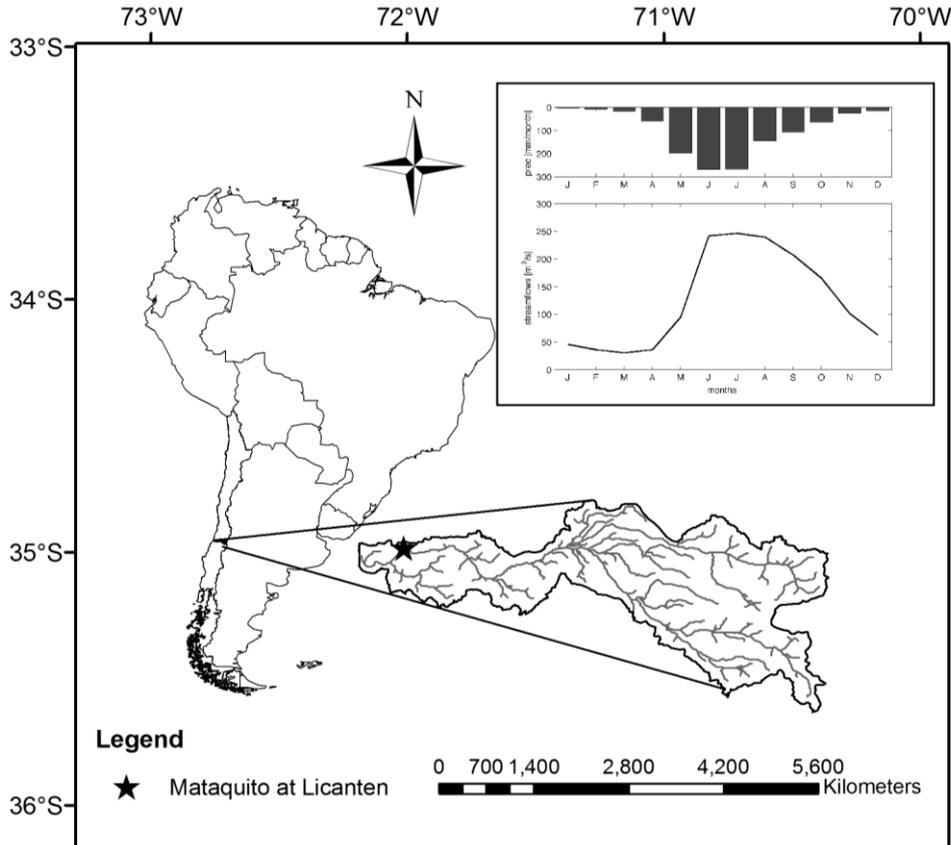
Caracterización de la amenaza climática en el diseño

- **Metodologías para la incorporación del cambio climático en el diseño**
 - Amplio rango de alternativas de diversa complejidad. Relevancia de:
 - Datos disponibles
 - Precisión requerida
 - Capacidad técnica y humana
 - Dos grandes grupos: Métodos de screening y métodos avanzados
 - Métodos de **screening**: métodos simples de carácter inicial para determinar la posibilidad de existencia de riesgo (orden de magnitud). Ejemplos: factores de amplificación
 - Métodos **avanzados**: métodos más complejos que describen más en detalle los riesgos potenciales. Ejemplos: ajustes empíricos y estadísticos, simulación numérica del clima futuro y downscaling.

Caracterización de la amenaza climática en el diseño

- **Metodologías para la incorporación del cambio climático en el diseño**
 - Tres etapas que pueden ser abordada con los enfoques descritos:
 - (1) Generación de series de tiempo y distribuciones espaciales con temperaturas y precipitaciones.
 - (2) Transformación de esta precipitación en escorrentía caracterizada por hidrogramas.
 - (3) Propagación hidráulica de hidrogramas a los puntos de interés
 - Información del pasado es crucial para la calibración y para detectar posibles condiciones de cambio climático previas, y sus efectos.
 - No sólo los máximos son importantes . Todo el régimen hidrológico puede ser relevante.

Área de estudio: Cuenca del río Mataquito

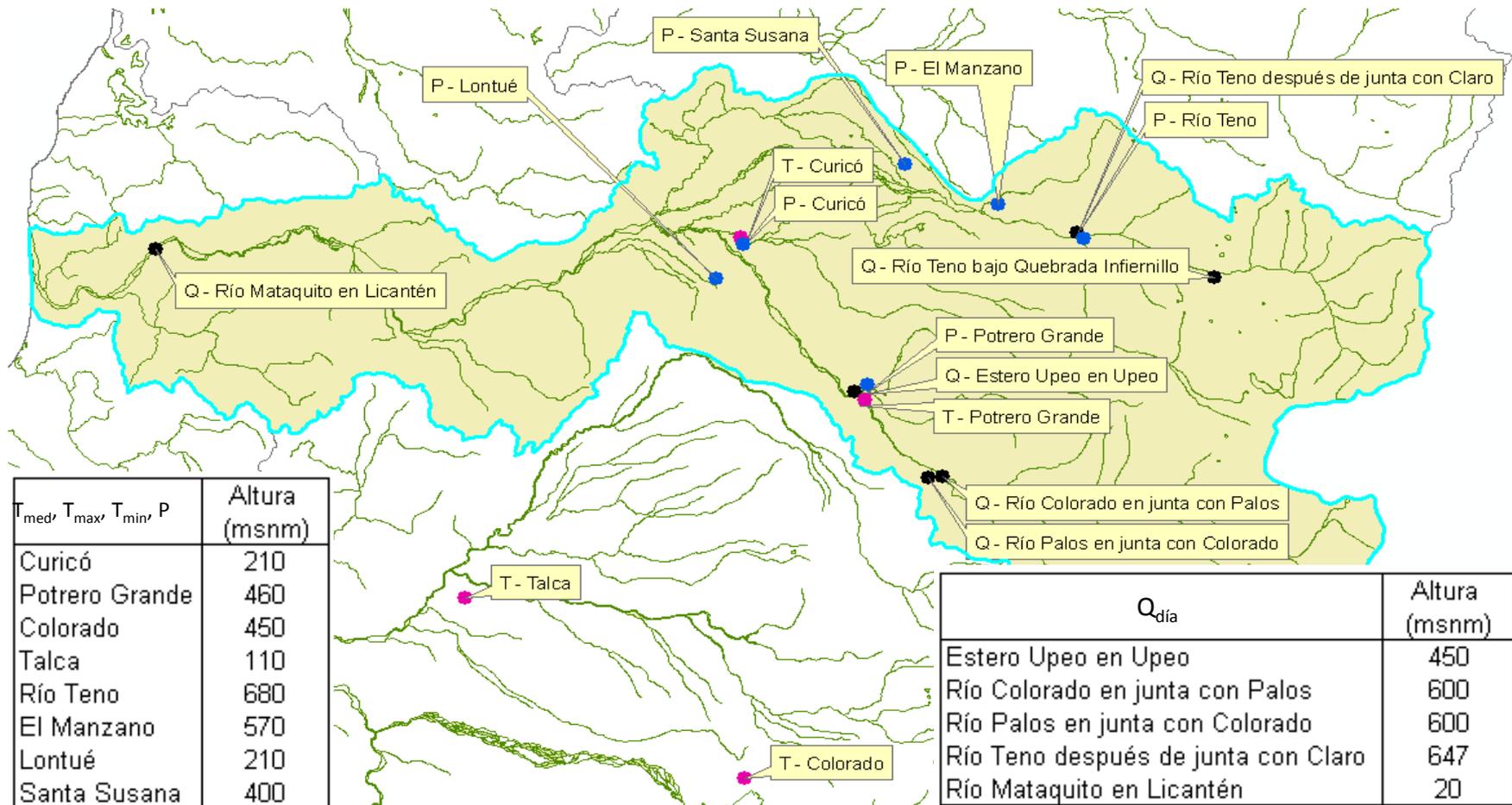


Área: 6332 km²

Clima Mediterráneo: 80% prec. en Mayo-Agosto

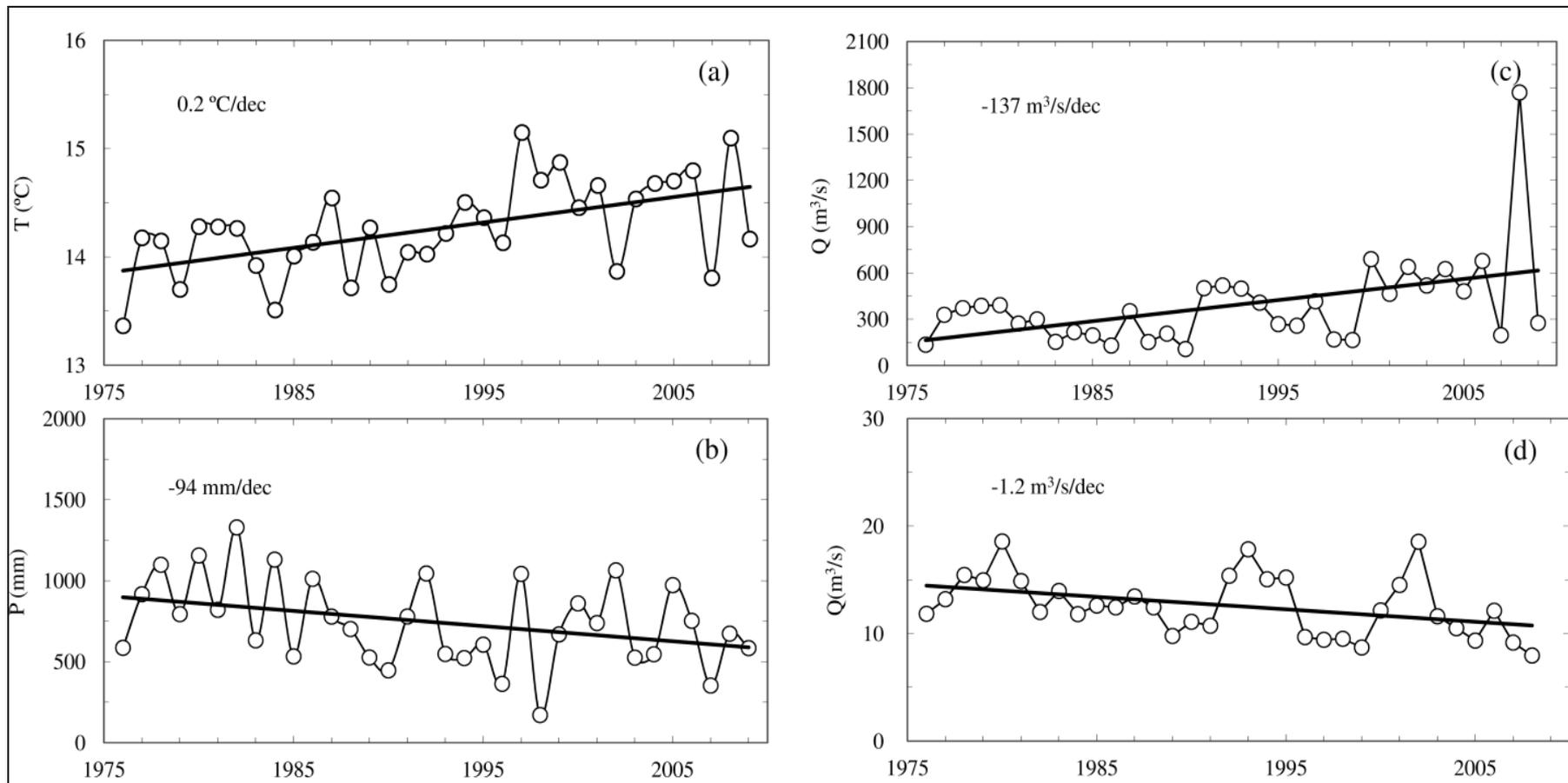
Precipitación anual: 1000 mm/año

Ejemplo en cuenca del Mataquito – inundaciones fluviales (Vicuña et al. 2013, submitted)



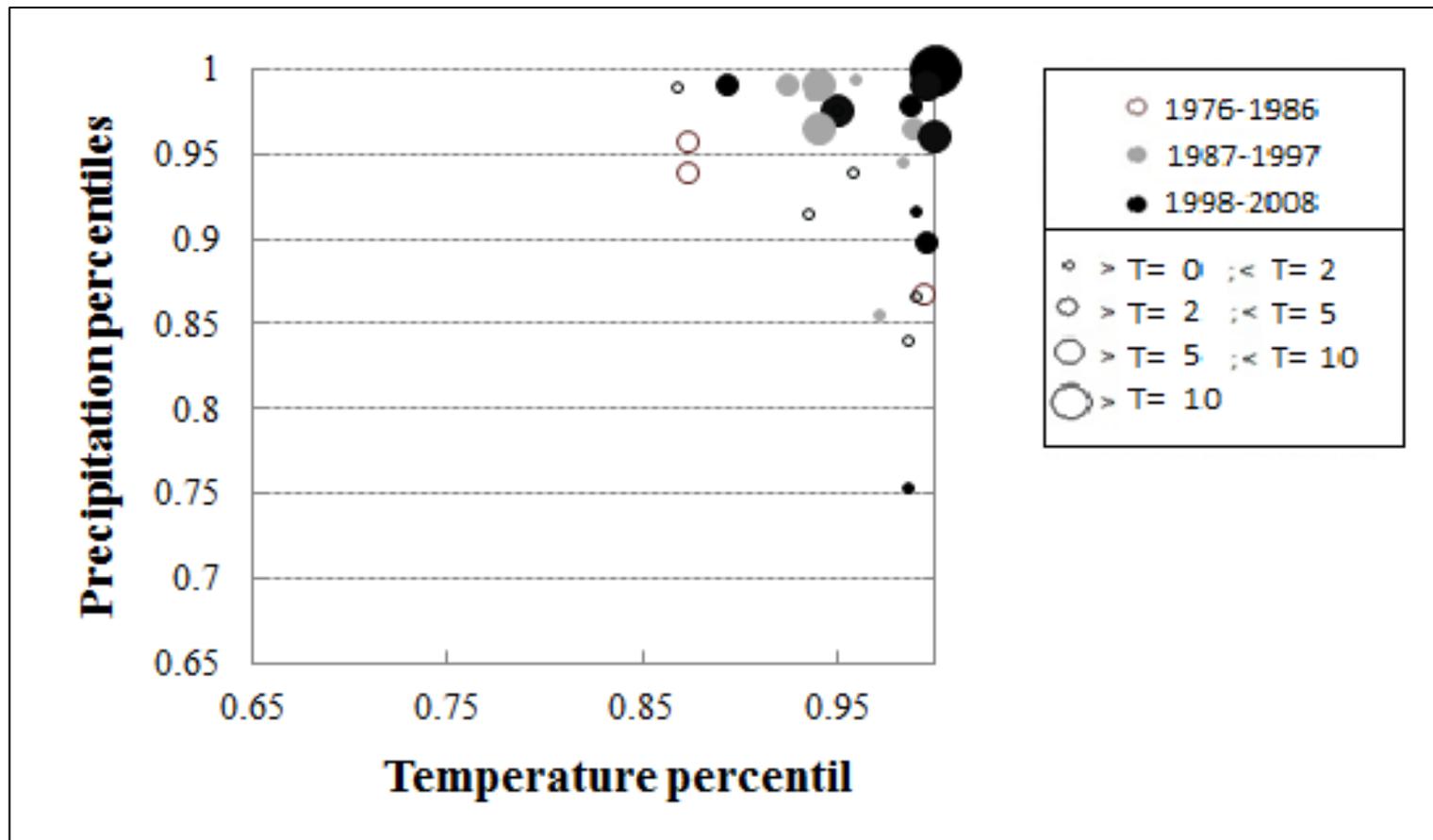
- Series diarias
- Se rellenan de series incompletas de P y Q
- Análisis (1) estacional, (2) periodo pluvial y nival, (3) anual
- Variables hidroclimatológicas e índices representativos
- Tendencias (Mann-Kendall y Regresión Lineal)

Tendencias hidroclimáticas



Ejemplos. a) Temperatura media anual en Curicó, b) Precipitación anual en Curicó, c) Caudales instantáneos máximos anuales en Colorado en junta con Palos, y d) caudales mínimos de 7 días en Palos junta con Colorado.

Tendencias hidroclimáticas



Ocurrencia conjunta de altas precipitaciones y altas temperaturas mínimas.

Ejemplo: comparación de dos eventos extremos

- Comparación entre 23 /mayo/2008 y 27/mayo/2002*

	2002	2008
P 2 días previos (mm)	103.6	83.9
Caudal Máximo (m ³ /s)	931	2690
T _{max} promedio (°C)	13,0	17,4
Cota estimada línea de nieve (m)	1700	2200

- Área extra de lluvia vs. nieve: 615 km²
 - Equivale a un día con 597 m³/s de caudal extra



* A partir de P's y T's en Curicó, adoptando una tasa de lapso de 9 °C/Km

- Nieve de eventos anteriores probablemente derretida (19-20 mayo, 2008 : 49.5 mm, T_{max} 14,6 °C (cota línea de nieve ~ 1800 m) . Equivalente a un día con 284 m³/s de caudal extra.
- El evento del 2008 es de menor magnitud (19,7 mm), pero produce un caudal mayor equivalente al menos a 881 m³/s de caudal extra.

Tendencias hidroclimáticas

- Tendencias positivas en T_{med} , sobretudo en primavera
- Primavera y verano cada vez más calurosos y secos
- Eventos extremos de T cada vez más extremos (T_{max} más altas y T_{min} más bajas)
- Tendencias negativas en la magnitud y frecuencia de P's, sobretudo en primavera. Disminución de eventos extremos más fuerte en otoño que en invierno.
- Lluvias primaverales, cada vez menores en volumen, son más pluviales.
- Tendencia no significativa al adelantamiento de la primavera (Aprox. 3 días/dec)

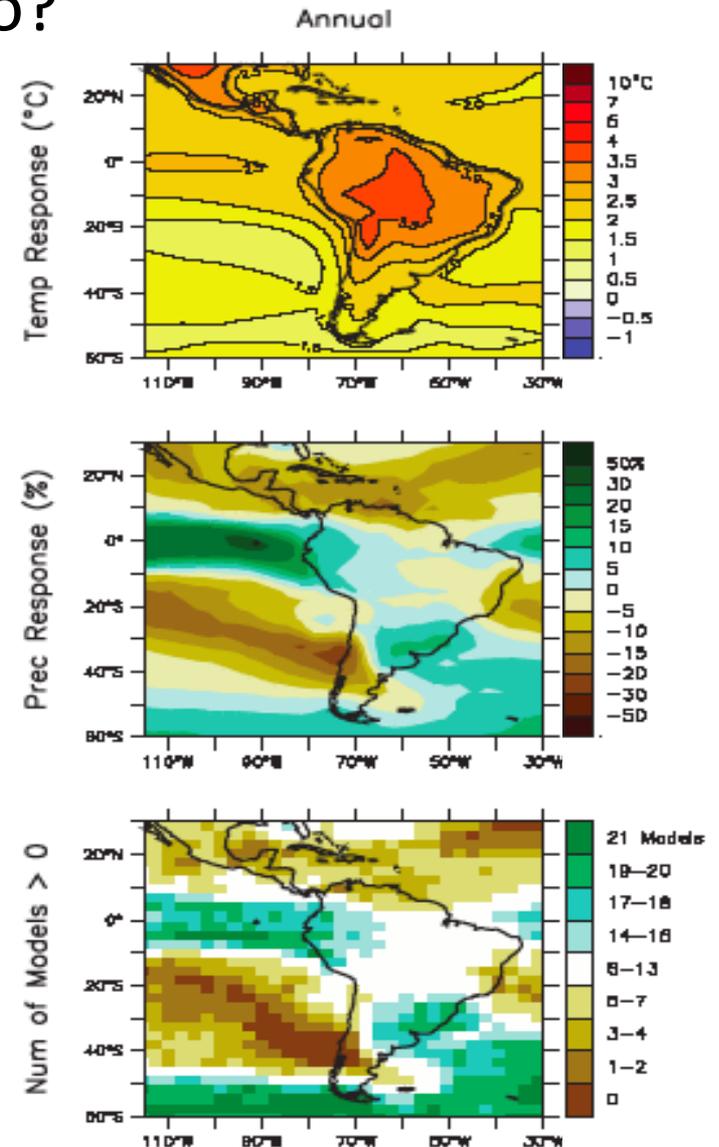
Tendencias hidroclimáticas

- Grandes crecidas asociadas a altas $P's$, T_{\min} diarias (pluviales) y más noches cálidas.
- Menor acumulación nival (sobretudo otoño). Menores $Q's$ en época nival a pesar de mayores $T's$
- Mayores 10 crecidas anuales (pluviales) principalmente a partir del 2000 en otoño
- Mayores 10 crecidas nivales al inicio y fin del registro. Crecidas iniciales por derretimiento de manto nival almacenado en los meses de lluvia. Crecidas mayores recientes relacionadas al parecer con la precipitación pluvial que escurre producto del aumento de $T's$.

Como los caudales de diseño se verán afectados durante el Siglo XXI debido al cambio climático?

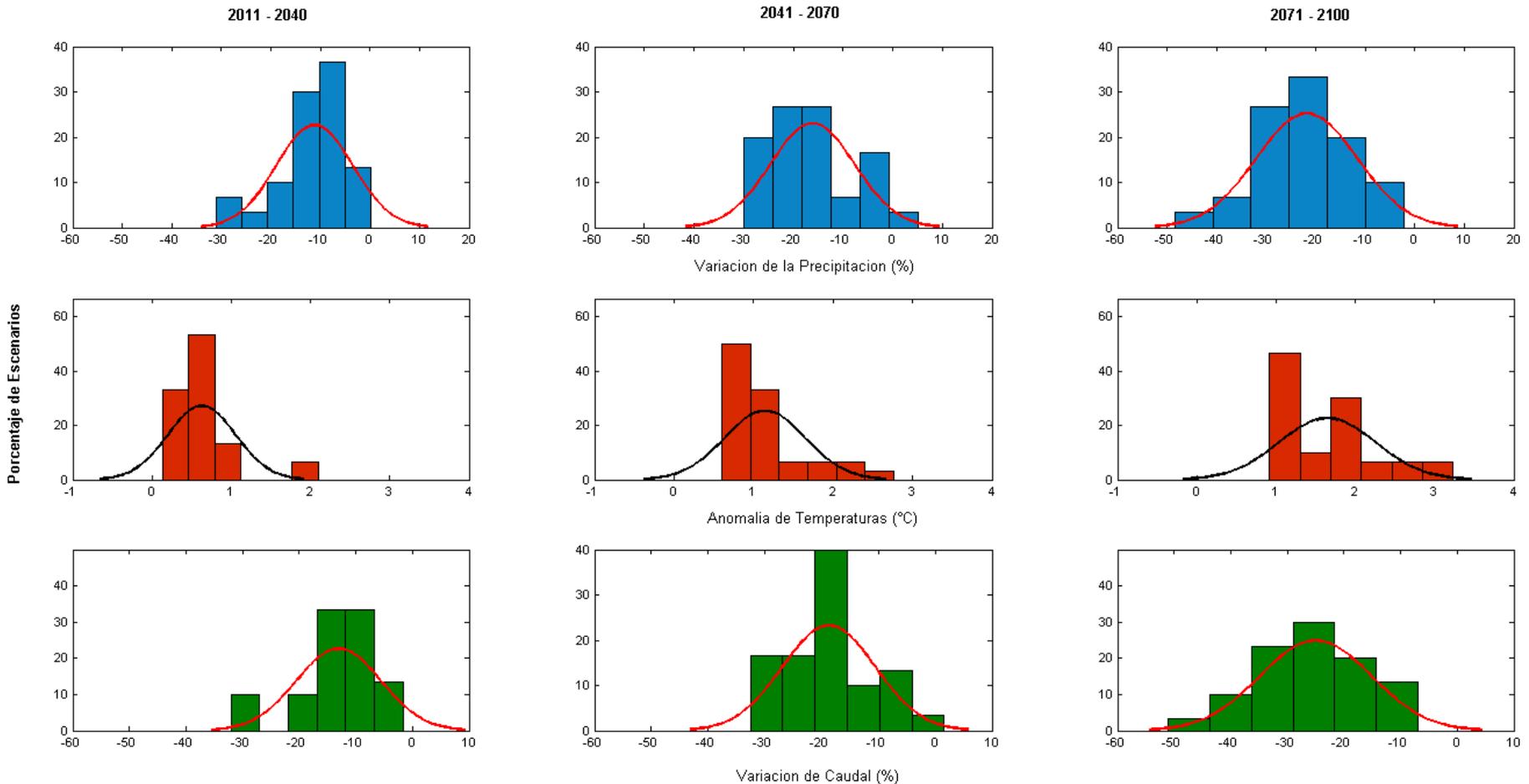
Proyecciones de cambio climático indican una disminución de precipitación generalizada en la región central de Chile

Al mismo tiempo, una atmosfera mas calida puede absorber mas vapor de agua aumentando la probabilidad de eventos de precipitación mas intensos.



Escenarios de Cambio Climático específicos cuenca Mataquito

Dos escenarios de GHG; 16 modelos GCM;
Tres periodos de tiempo; Simple modelo de balance hídrico



Recordar...

- **Metodologías para la incorporación del cambio climático en el diseño**
 - Tres etapas que pueden ser abordada con los enfoques descritos:
 - (1) Generación de series de tiempo y distribuciones espaciales con temperaturas y precipitaciones.
 - (2) Transformación de esta precipitación en escorrentía caracterizada por hidrogramas.
 - (3) Propagación hidráulica de hidrogramas a los puntos de interés
 - Información del pasado es crucial para la calibración y para detectar posibles condiciones de cambio climático previas, y sus efectos.
 - No sólo los máximos son importantes . Todo el régimen hidrológico puede ser relevante.

VARIABLES DEL MODELO HIDROLÓGICO VIC

Entradas (observada y GCM corregida):

- Precipitación diaria
- Temperatura máxima y mínima diaria

Salidas:

- Caudales diarios
- SWE (snow water equivalent)
- evapotranspiración
- contenido de humedad del suelo

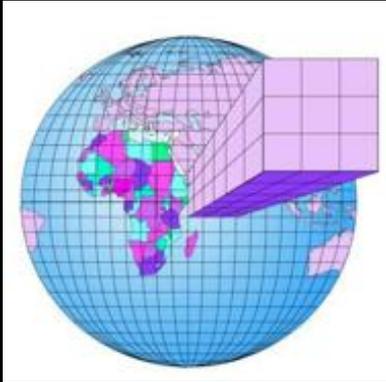


Precipitación observada disponible en grilla regular y por periodos extendidos de tiempo (40-50 años) es un inconveniente en la cuenca del Mataquito

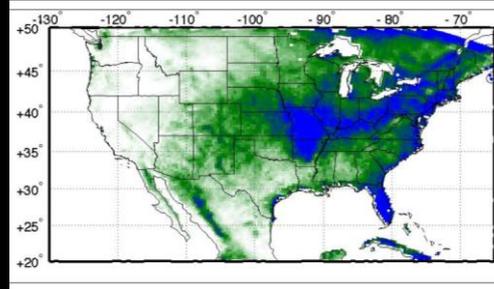


Necesidad de utilizar productos combinados de satélites (TRMM) y modelos atmosféricos (NCEP-NCAR Reanalysis) validados con observaciones (CRU)

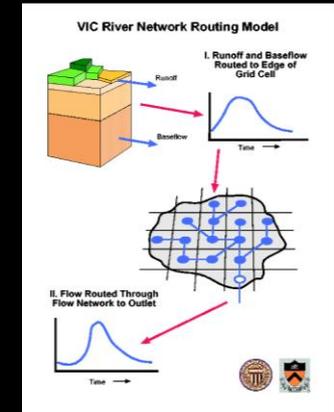
Como se utilizan las proyecciones de Cambio Climático para predicciones hidrológicas?



1. Dependemos de General Circulation Models (GCMs) para estimar el clima futuro (resolución 2.5 grados)



2. Estas proyecciones son escaladas (downscaled) espacialmente con métodos estadísticos o dinámicos (resolución 25 km)

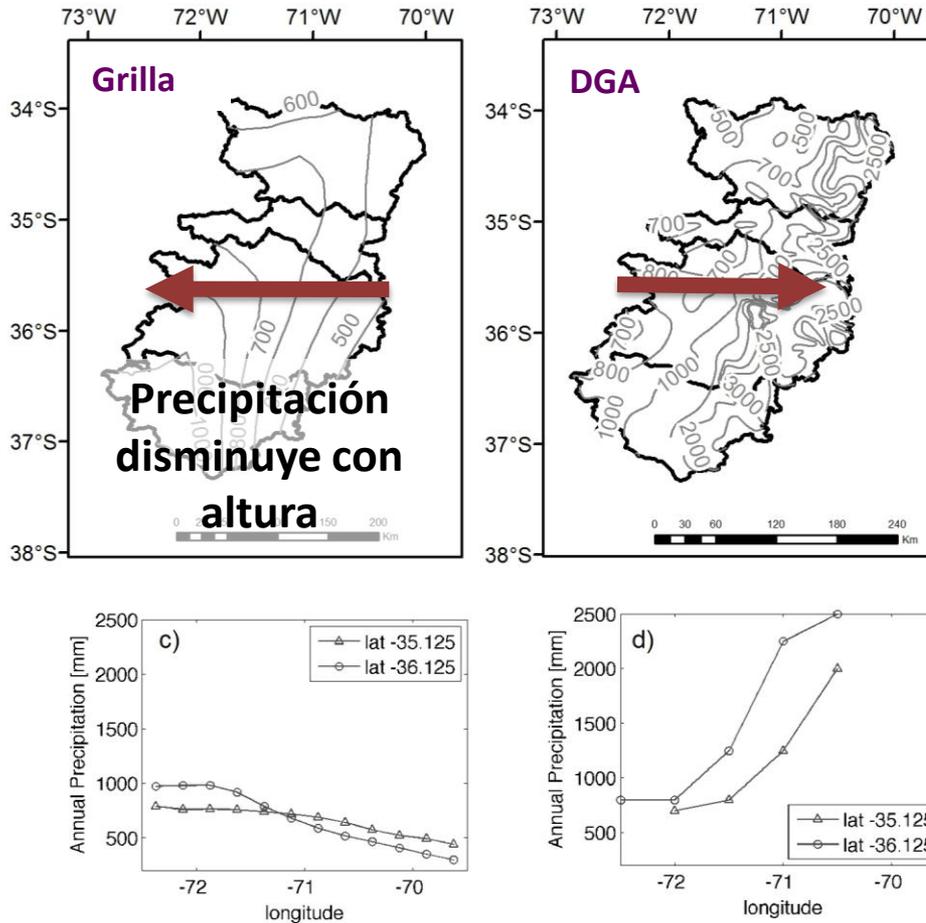


3. Campos atmosféricos escalados alimentan el modelo hidrológico VIC

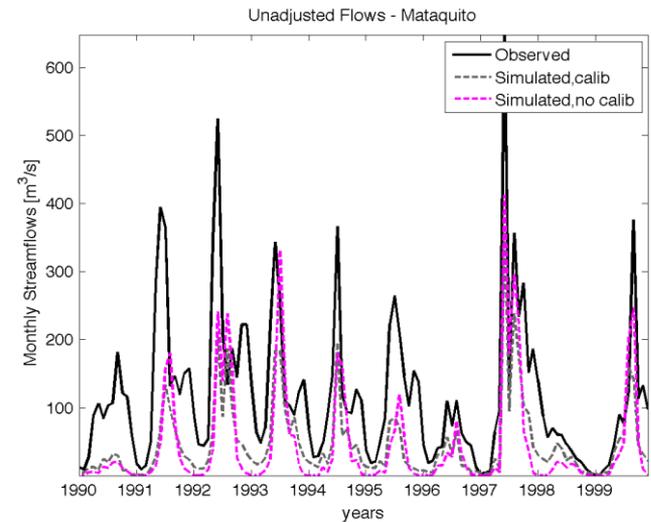
4. Las simulaciones son usadas para planeamiento de sequías, modelos agrícolas, hidrológicos, etc.



Sin embargo, los datos en grilla de precipitación no capturan los efectos orográficos en la cercanía de los Andes

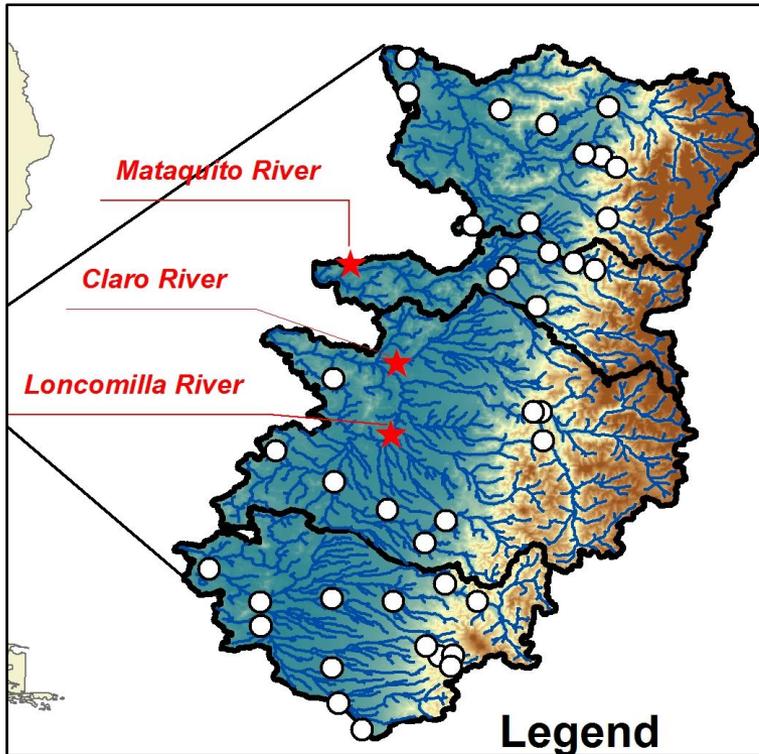


Repercusiones hidrológicas



Pobre representación de caudales bajos y no derretimiento de nieve

Un simple Co-kriging de precipitación mensual con elevación como co-variable fue usado para remover el sesgo en la precipitación en grilla (P_{grid})



40 pluviómetros de la DGA seleccionados con 20 años y no mas de 10% datos faltantes

12 mapas de precipitación interpolada creados para obtener Precipitación ajustada (P_{adj}) por elevación

$$P_{adj}(i,j,t) = P_{grid}(i,j,t) \times \frac{\bar{P}_{obs,mon}(i,j)}{\bar{P}_{grid,mon}(i,j)}$$

Metodo:

Usamos Statistical
Downscaling para reducir la
escala espacial de 12 GCMs
(General Circulation
Models) con dos escenarios
de emissions de CO₂ (RCPs).

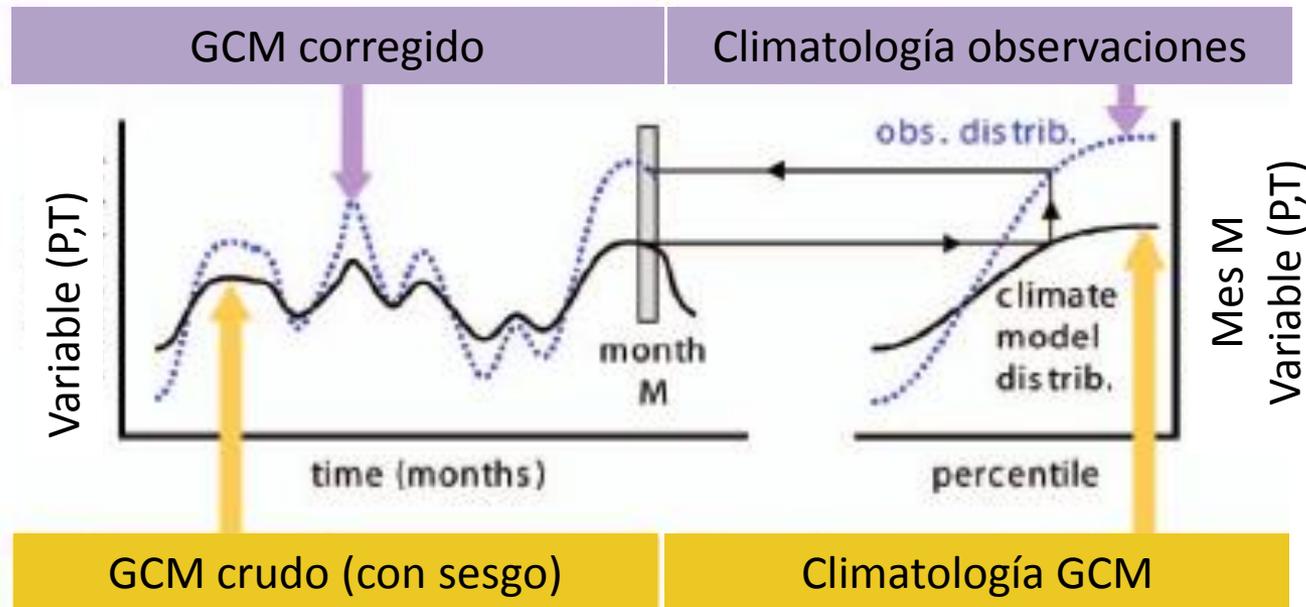
Periodo: 1950-2100
(151 años)

<i>CMIP5 ModelID</i>	<i>Modeling group</i>
canesm2	Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis
cnrm-cm5	Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques, France
csiro-mk3-6-0	CSIRO Atmospheric Research, Australia
gfdl-cm3	GFDL, USA
giss-e2-r	NASA / Goddard Institute for Space Studies, USA
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics, Russia
ipsl-cm5a-mr	Institut Pierre Simon Laplace, France
miroc5	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
mpi-esm-lr	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
mri-cgcm3	Meteorological Research Institute, Japan
ccsm4	National Center for Atmospheric Research, USA
hadgem2-cc	Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK

RCP4.5: radiative forcing level 4.5 W/m² by year 2100 (~ 650 ppm CO₂ eq.)

RCP8.5: radiative forcing level 8.5 W/m² by year 2100 (~ 1370 ppm CO₂ eq.)

Proyecciones climáticas de Precipitación y Temperatura de GCMs tienen sesgos substanciales y es necesario removerlos previo al uso en el modelo hidrológico

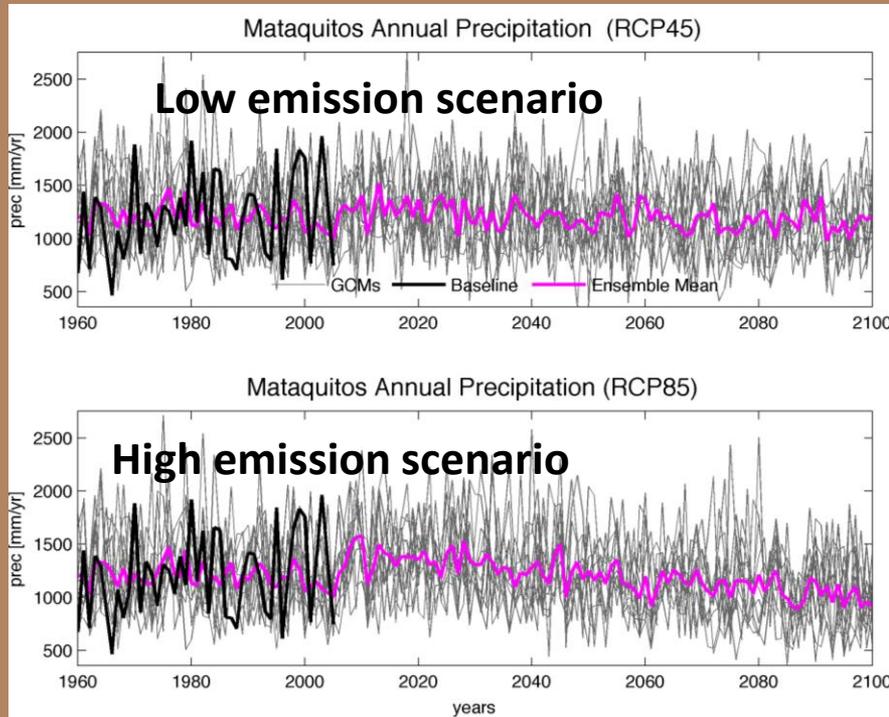


Usando observaciones mensuales en el periodo histórico (1960-1999), igualamos la función de probabilidad observada y del GCM para cada mes.

El método ajusta los momentos del GCM a los momentos observados usando una distribución de probabilidad empírica

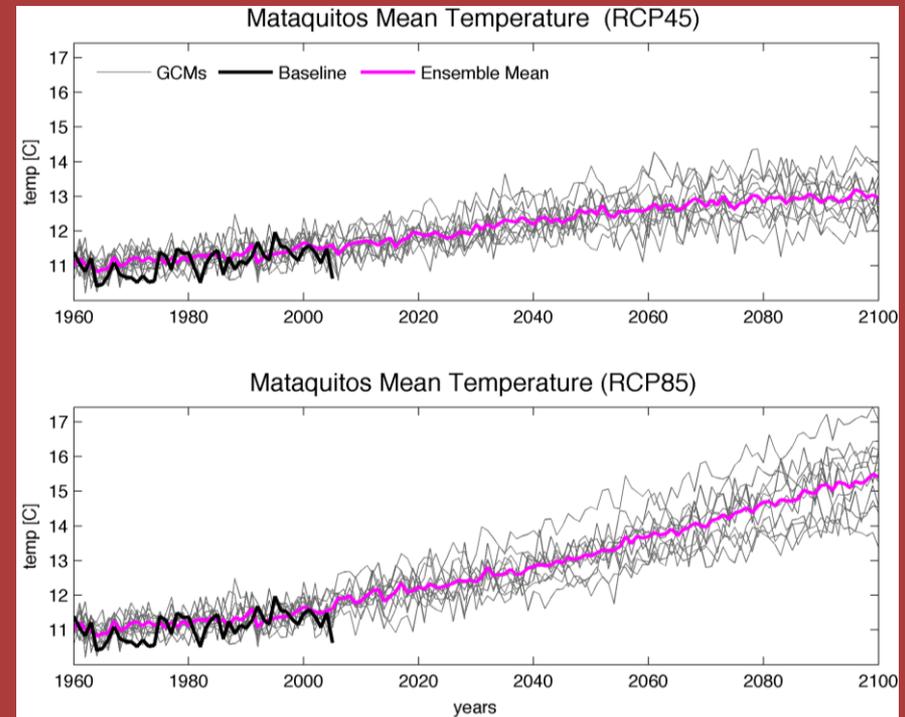
Precipitación anual en la cuenca disminuye (6-14%) acompañado con un 2-3.5°C calentamiento a finales del siglo XXI.

Precipitación



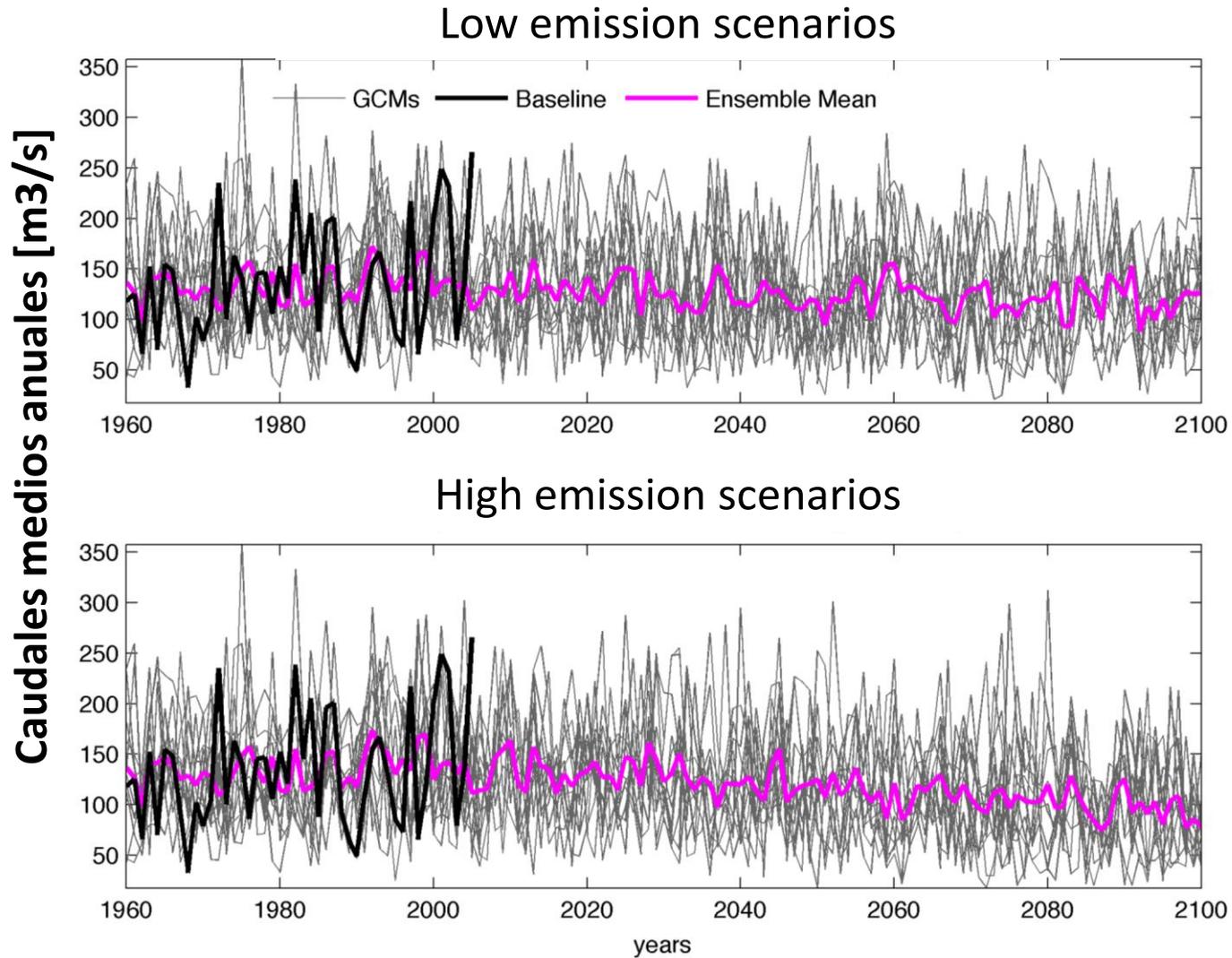
mas seco

Temperatura media

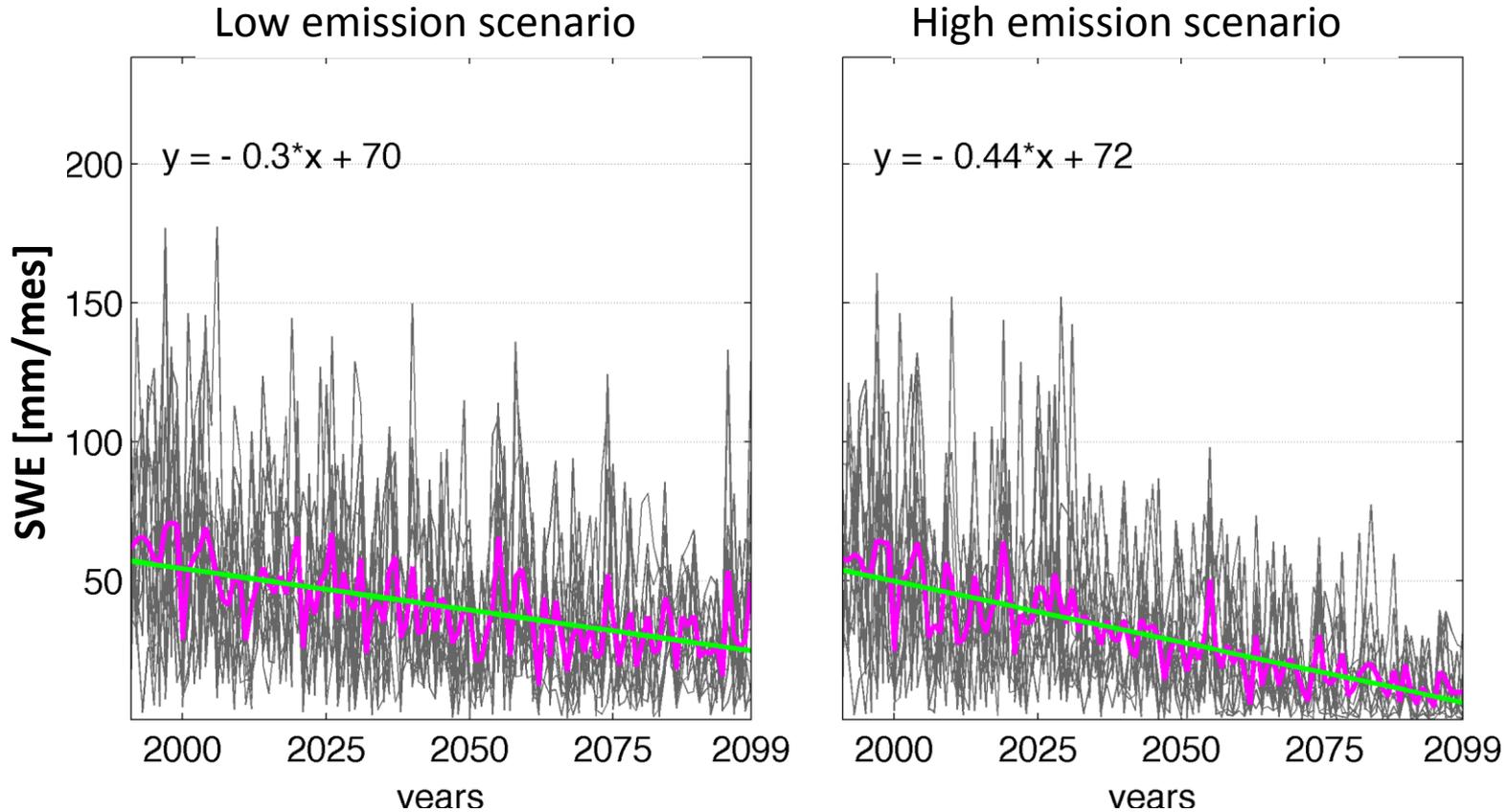


mas calido

Caudales anuales en la cuenca van a muy probablemente disminuir durante el Siglo XXI



El aumento de temperatura va a repercutir en la cobertura de nieve (Snow water equivalent) durante los meses de invierno



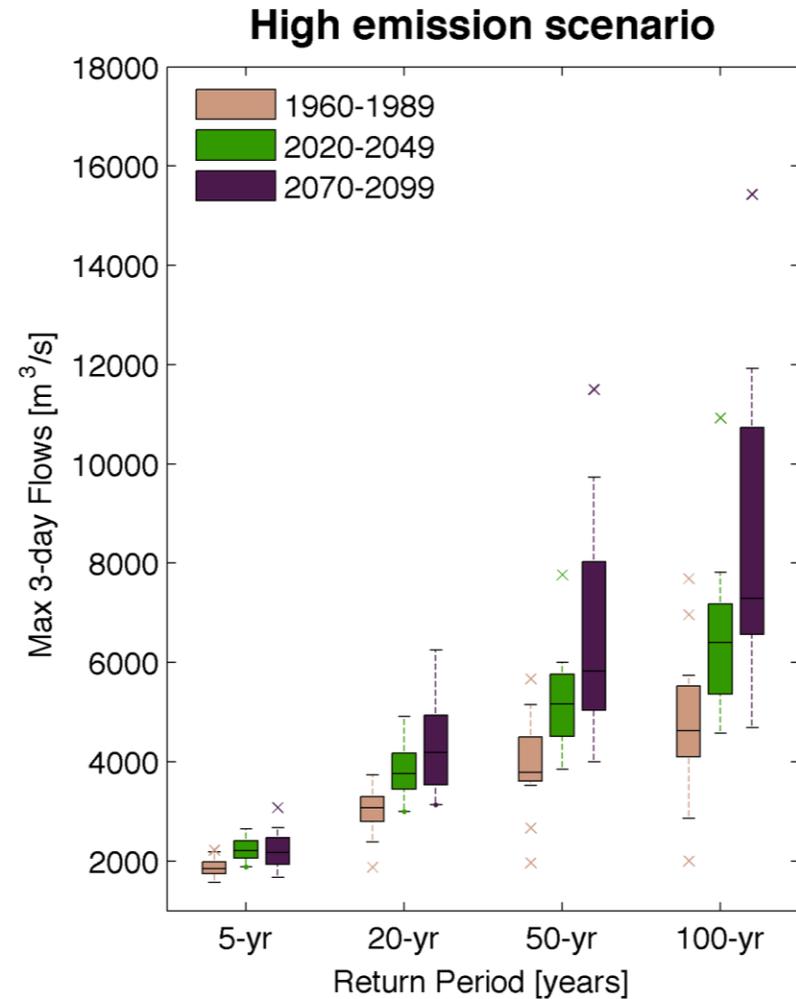
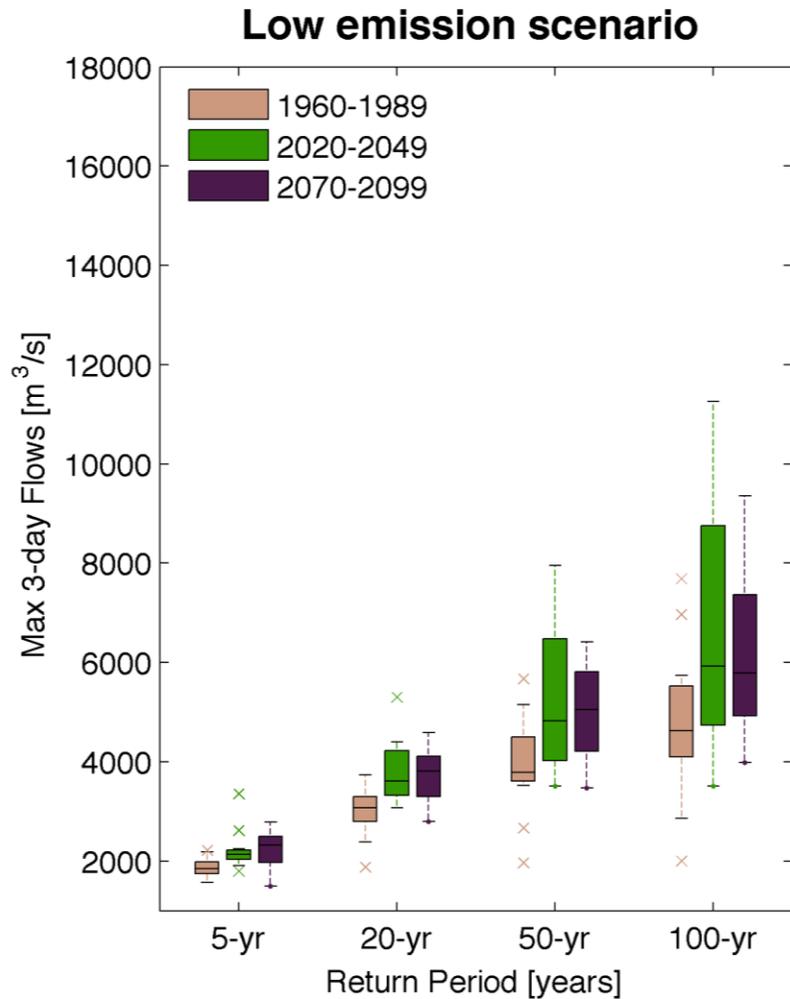
Si bien la tendencia general en caudales es negativa, la intensificación de eventos de lluvia va a afectar los caudales picos



Analisis de frecuencia de caudales

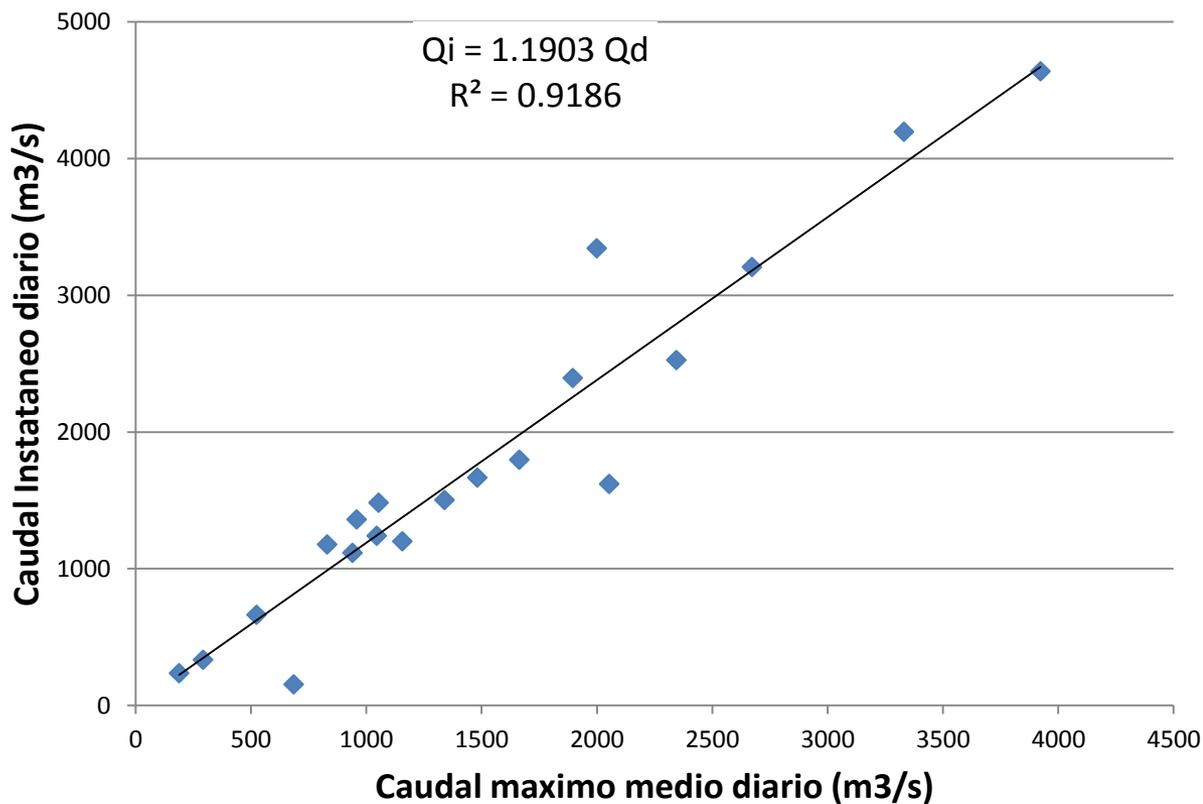
- Seleccionar 3-dias maximos anuales usando medias deslizantes
- Ajustar una Generalized Extreme Value (GEV).
- Alternativa en estudio: Distribución con parámetros variables para incorporar tendencias monotónicas (Vogel et al., 2011)

Caudales máximos anuales con un periodo de retorno de 100 años aumentan en promedio 15-50* % para el periodo 2070-2099



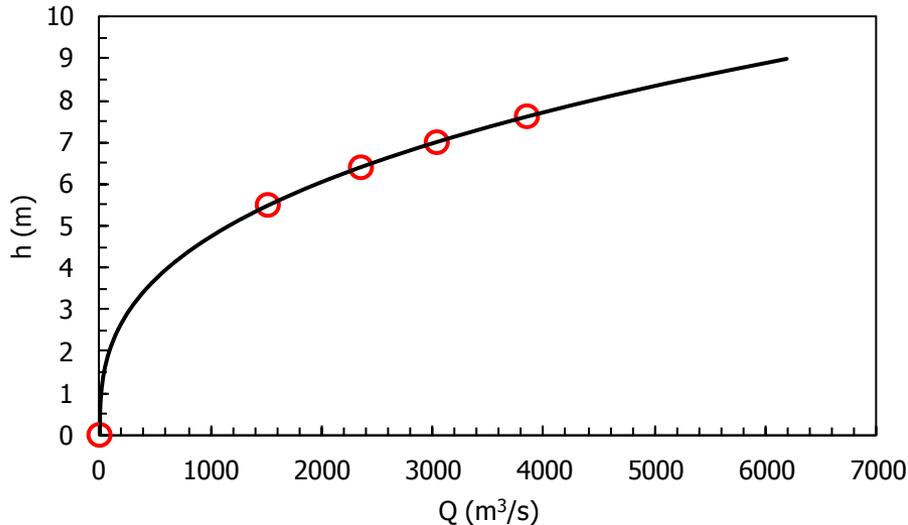
* Para el low/high emission escenarios respectivamente

Caudales máximos diarios son transformados a caudales instantáneos usando un modelo lineal*



* McCuen y Beighley, 2003. J of Hydrology

Como se traducen estos caudales a niveles de inundación en el río?

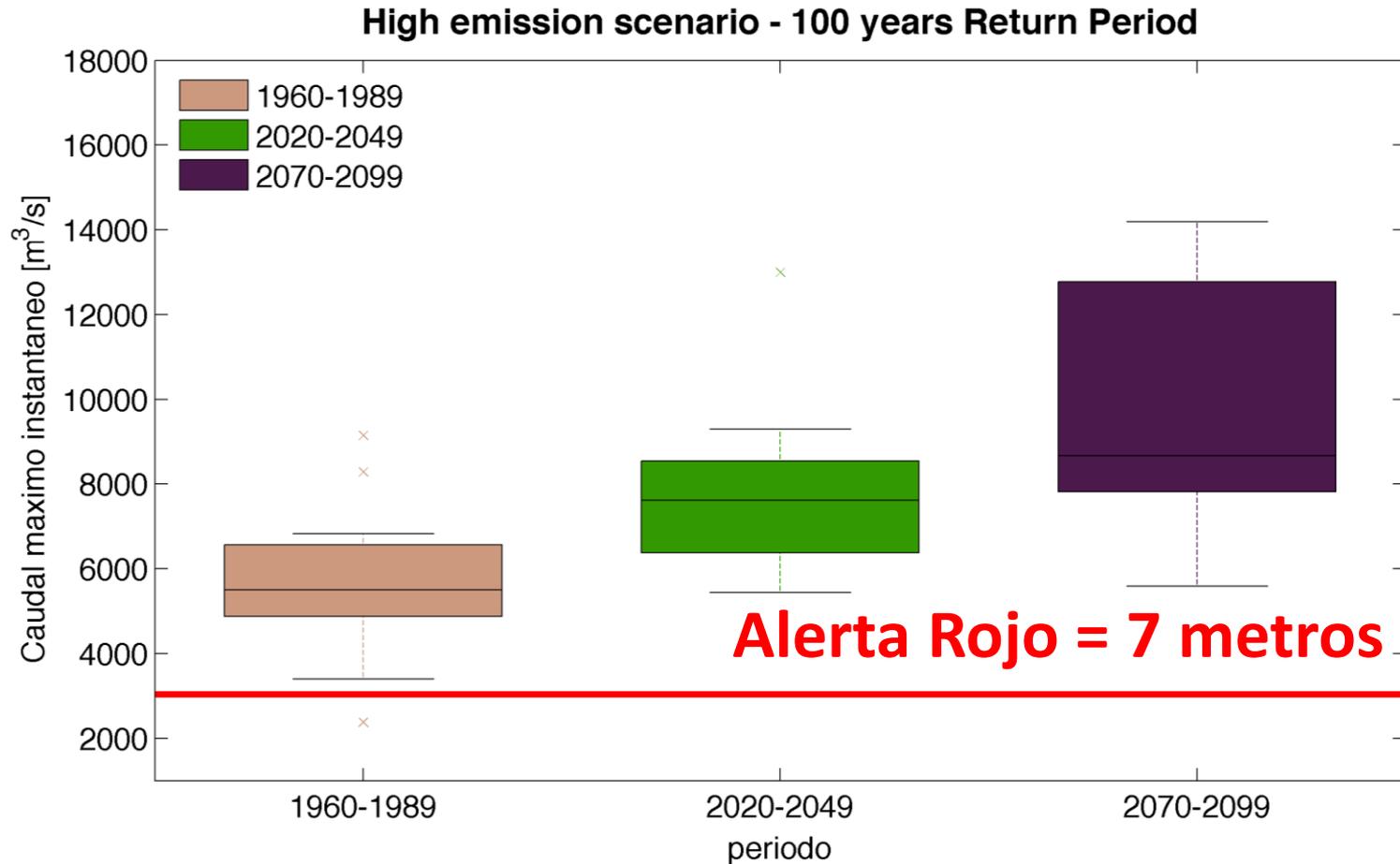


	Alerta Azul	Alerta Amarilla	Alerta Roja
Q (m^3/s)	1516	2355	3038
H (m)	5.5	6.4	7

* DGA (2010), Determinación de los umbrales de alerta de caudales, lluvias y temperaturas del sistema de transmisión de datos de la DGA

El umbral de inundación de la ciudad de Licantén ha sido definido en 7 metros (alerta roja)*. Un segundo estudio define un caudal de 3850 m^3/s (7.62 m) para la alerta roja.

Caudales máximos instantáneos con un periodo de retorno de 100 años superan ampliamente el umbral de Alerta Rojo en Licantén



Conclusiones

- En consenso de 12 GCMs indica un futuro ligeramente mas seco (6-14%) y mas calido (2-3.5 °C) a fines del Siglo XXI.
- Lo anterior se condice con las tendencias observadas en los últimos 30 años.
- Un modelo hidrológico de carácter continuo (VIC) permitiría generar escenarios futuros de escorrentía para el cálculo de caudales relevantes para el diseño de puente.
- La falta de observaciones de precipitación en la resolución espacial y temporal necesaria para este tipo de análisis es siempre un impedimento.
- La magnitud de los caudales máximos anuales muy probablemente va a incrementarse en el futuro como resultado de tormentas mas intensas.
- Conocida la curva de descarga o la batimetría, se puede asociar profundidades a los distintos caudales.
- El Umbral de Alerta Rojo en Mataquito en Licantén será ampliamente superado sugiriendo la necesidad de adaptar el diseño de obras de infraestructura en la región.