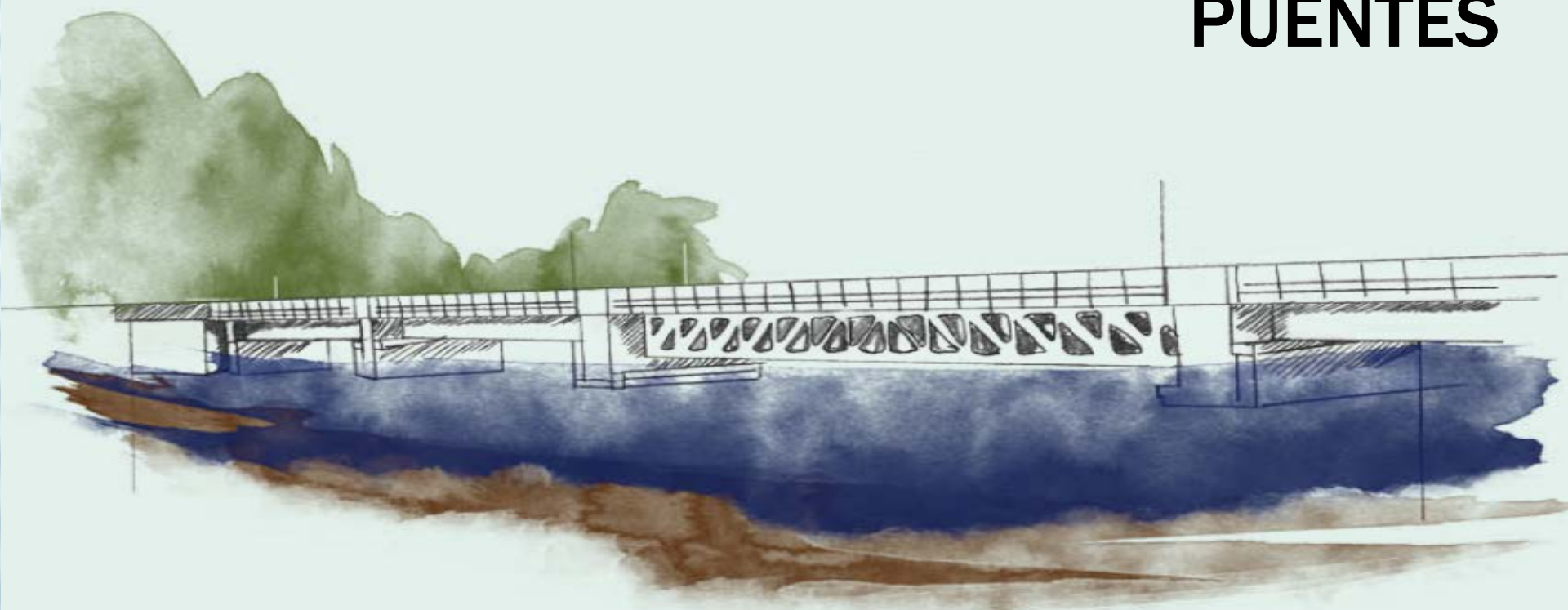


Marco estratégico de adaptación de la infraestructura al cambio climático

APLICACIÓN CASO PUENTES



This project was undertaken with the financial support of:
Ce projet a été réalisé avec l'appui financier de :
Este proyecto fue realizado con el apoyo financiero de:



Environment
Canada

Environnement
Canada

Eleonora de María¹, Jorge Gironás^{1,2,3}, Sebastián Vicuña¹

CASO PUENTE EN EL RÍO MATAQUITO

¹ Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC

² Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC

³ CIGIDEN

PROGRAMA

- × Introducción
- × Área de estudio: Cuenca del río Mataquito
 - + Descripción
 - + Tendencias hidroclimáticas históricas
- × Metodología propuesta
 - + Modelación Hidrológica
 - + Datos requeridos
 - + Descripción por etapas
 - + Metodología propuesta
 - + Proyecciones futuras y Futuras crecidas
 - + Efectos en el diseño de puente

INTRODUCCIÓN

× Infraestructura de transporte:

- + Rol estratégico reconocido por el Plan Director de Infraestructura 2010-2025 del MOP
- + Inversión pronosticada de US\$15 mil millones.
- + CC es un desafío identificado por el Plan

× Institucionalidad

- + Dir. de Vialidad: desarrollo de infraestructura vial y puentes.
- + Depto. de Proyectos de Estructura: diseños y aspectos normativos.
- + Depto. de Puentes: Construcción y conservación.

INTRODUCCIÓN

× Institucionalidad

- + Dir. de Planeamiento (DIRPLAN) y Gobiernos regionales: Participación en la planificación.
- + M. de Desarrollo Social: Participación en etapas de factibilidad y diseño.

× Normativa

- × Manual de Carreteras: regula el ciclo de vida completo de las obras de vialidad.
- × Documento de consulta que uniformiza y sistematiza criterios y procedimientos.
- × Capítulos específicos en relación a clima-agua-vialidad.

INTRODUCCIÓN

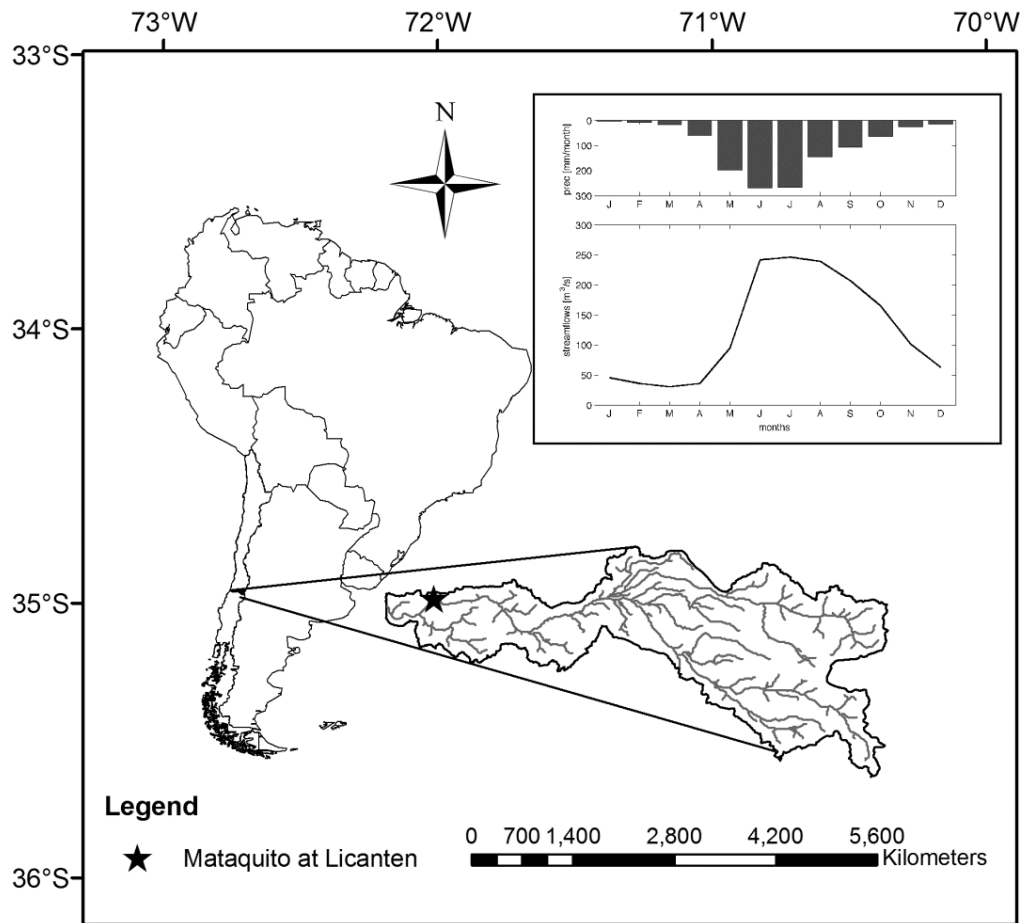
- × **Aspectos hidrológicos e hidráulicos del Manual**
 - + **Supuesto de estacionalidad**
 - + **Herramientas fundamentales: análisis de frecuencia y distribuciones de probabilidad, lluvias de diseño y modelación lluvia-escorrentía, y cálculo hidráulicos.**
 - + **Consideraciones para el diseño incluye el cálculo de crecidas de $T = 5, 20, 50$ y 100 años para evaluación de socavación.**

ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO MATAQUITO

BASADO EN RESULTADOS DE VICUÑA ET AL. (2013)

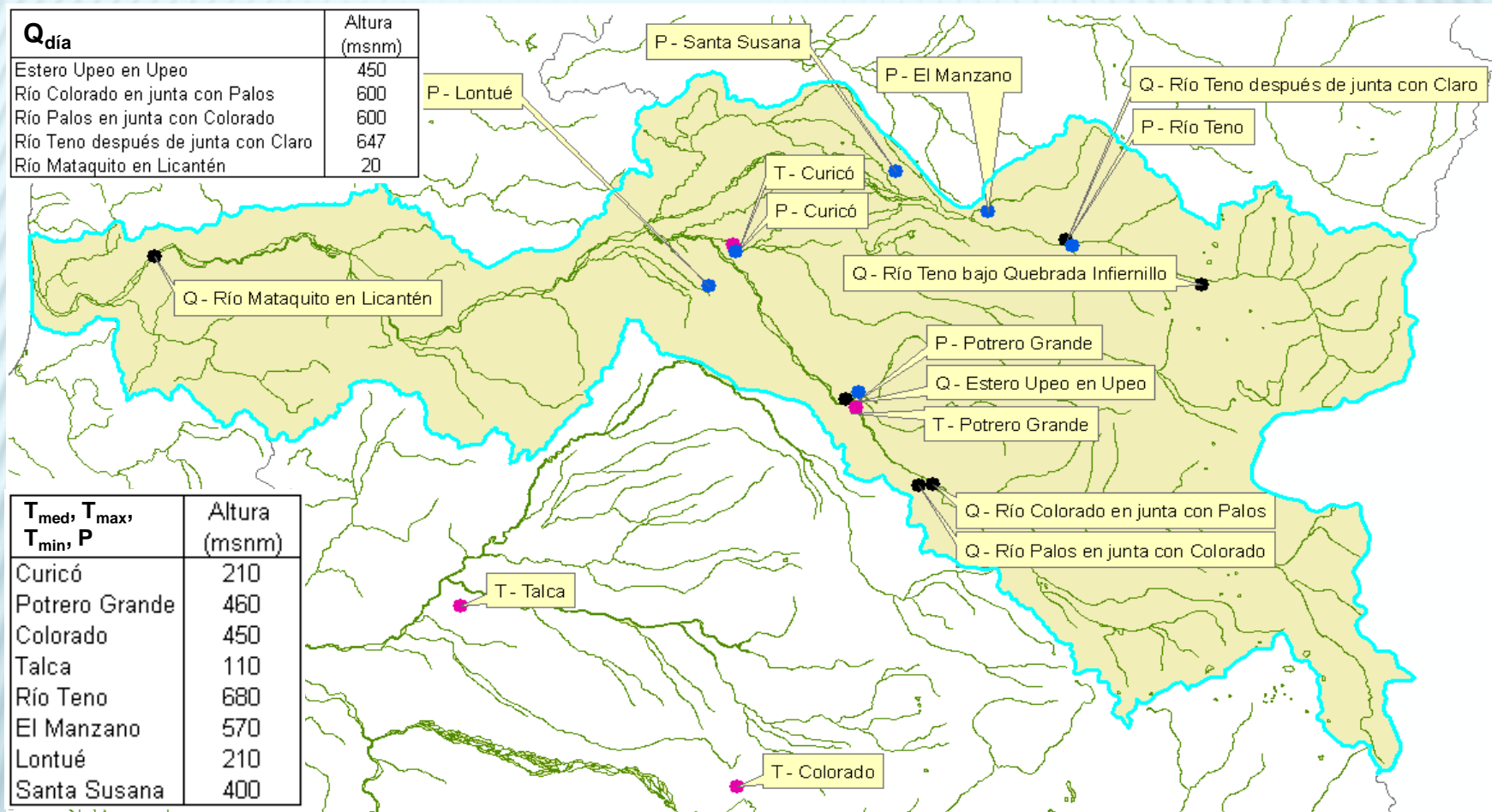


DESCRIPCIÓN



- Área: 6332 km²
- VII Región del Maule, entre los 34,5° y 35,3° de latitud Sur
- Elevaciones máximas = 4.000 m
- Clima Mediterráneo con meses secos en verano.
- 80% de precipitación en Mayo-Agosto
- Precipitación anual: 700-1000 mm/año.
- Se considera la ubicación de un puente a la altura de la estación fluviométrica de Licantén.

DESCRIPCIÓN

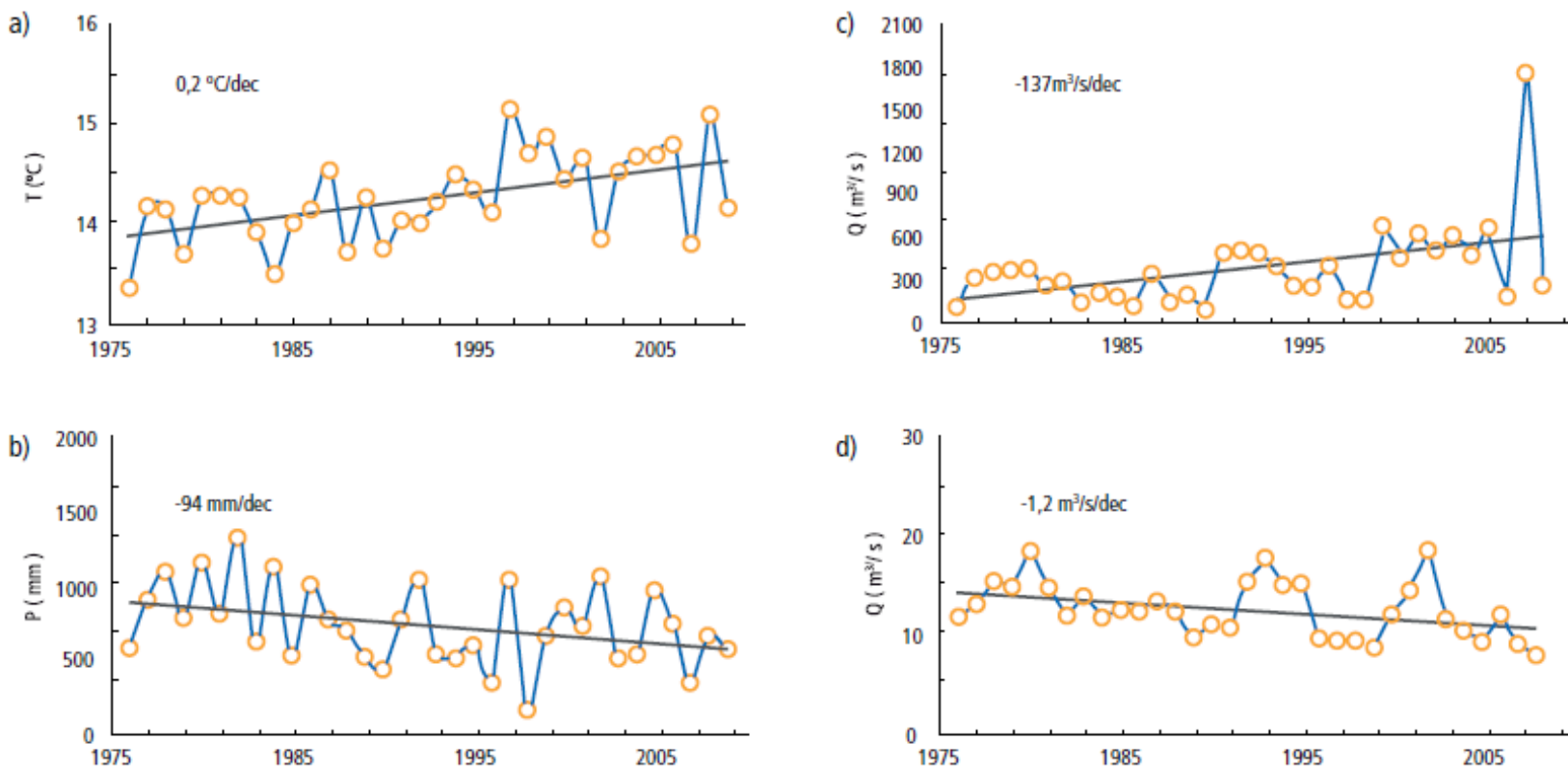


- Series diarias, con algún relleno, periodo 1976 – 2009.
- Análisis del tipo (1) estacional, (2) periodo pluvial y nival, (3) anual
- Análisis de tendencias (Mann-Kendall y Regresión Lineal) en variables hidroclimatológicas , eventos extremos e índices representativos

TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS HISTÓRICAS

Figura 4D.10

Ejemplos de tendencias hidroclimáticas en la cuenca del río Mataquito



Fuente: Vicuña et al. (2013).

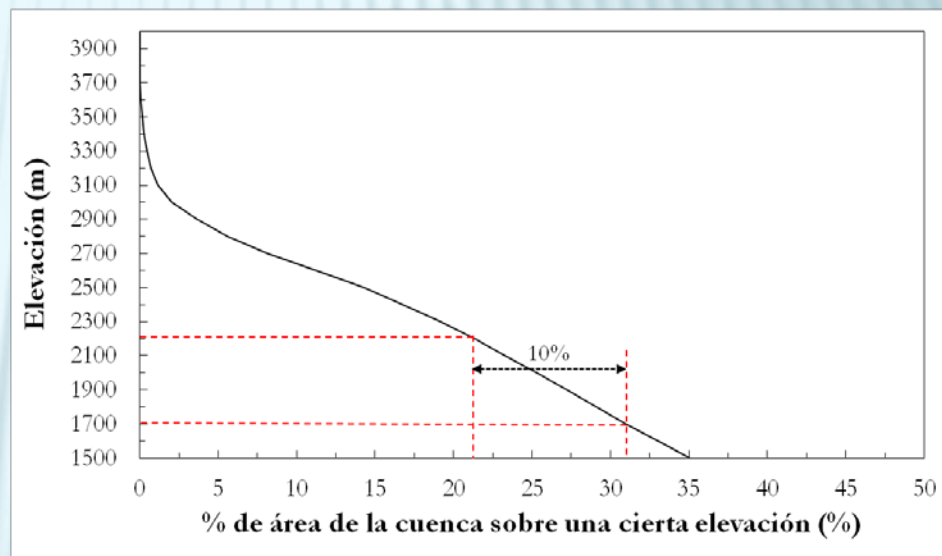
Nota: a) Temperatura media anual, estación de Curicó; b) precipitación anual, estación Curicó; c) caudal maximo instantaneo, estación Río Colorado en Junta con Palos; y d) caudal promedio de los siete días mas secos, estación Palos Colorado.

TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS HISTÓRICAS

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

- Área extra de lluvia vs. nieve: 615 km² (usando estación en Curicó, y tasa de lapso de 9 °C/Km)
- Equivale a un día con 597 m³/s de caudal extra

	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



- 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 a al menos 881 m³/s de caudal extra.

TENDENCIAS HIDROCLIMÁTICAS HISTÓRICAS

Resumen (1/2)

- + Tendencias positivas en T media, particularmente en primavera, teniéndose primavera y verano cada vez más calurosos y secos.
- + T's extremas altas y bajas cada vez lo son más
- + Tendencias negativas en 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 HISTÓRICAS

Resumen (2/2)

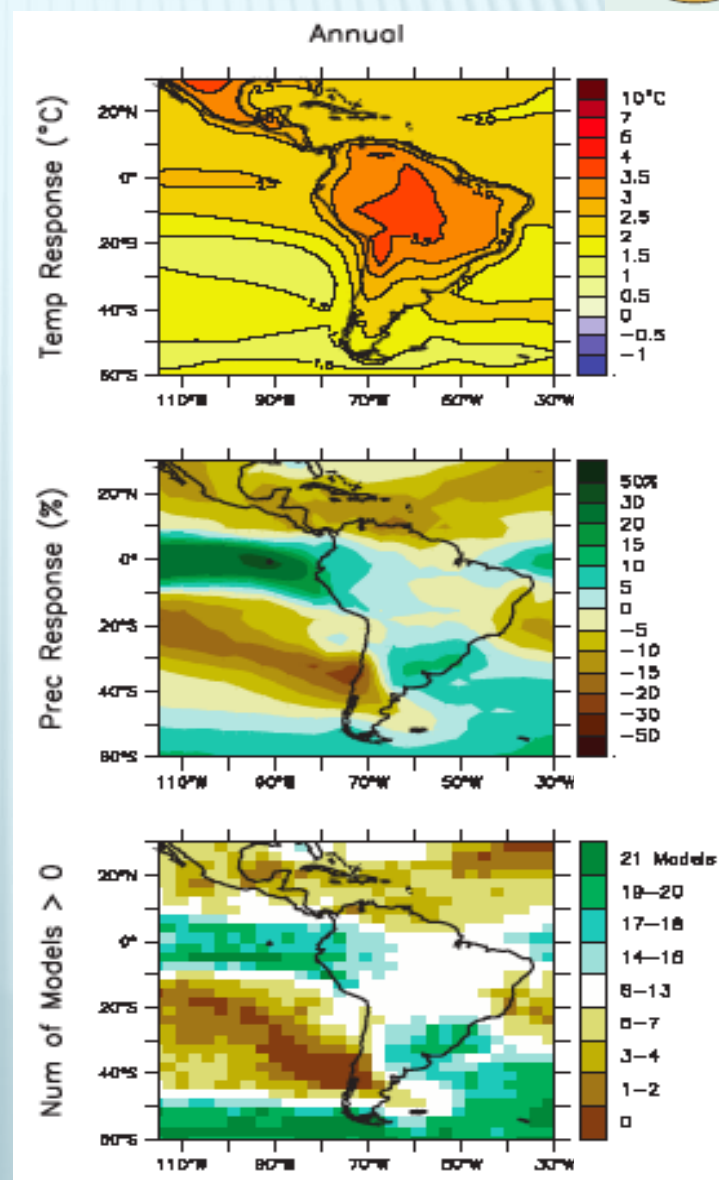
- + Grandes crecidas pluviales por altas P's, y Tmin diarias .
- + Menor acumulación nival (sobretudo otoño). Menores Q's en época de deshielo a pesar de mayores T's
- + Mayores 10 crecidas anuales (pluviales) principalmente a partir del 2000 en otoño.
- + Mayores 10 crecidas nivales al inicio y fin del registro. Crecidas iniciales por derretimiento de manto nival. Crecidas mayores recientes por precipitación pluvial que escurre producto del aumento de T's.

METODOLOGÍA PROPUESTA

SITUACIÓN FUTURA

- × Proyecciones de CC indican una disminución de precipitación generalizada en la región central de Chile y un aumento de temperatura.
- × Una atmosfera mas cálida puede absorber mas vapor de agua aumentando la probabilidad de eventos de precipitación mas intensos.
- × ¿Que pasará en la zona de estudio? ¿Cuáles serían las implicancias para el diseño de un puente?

IPCC AR4 (Christensen et al., 2007)

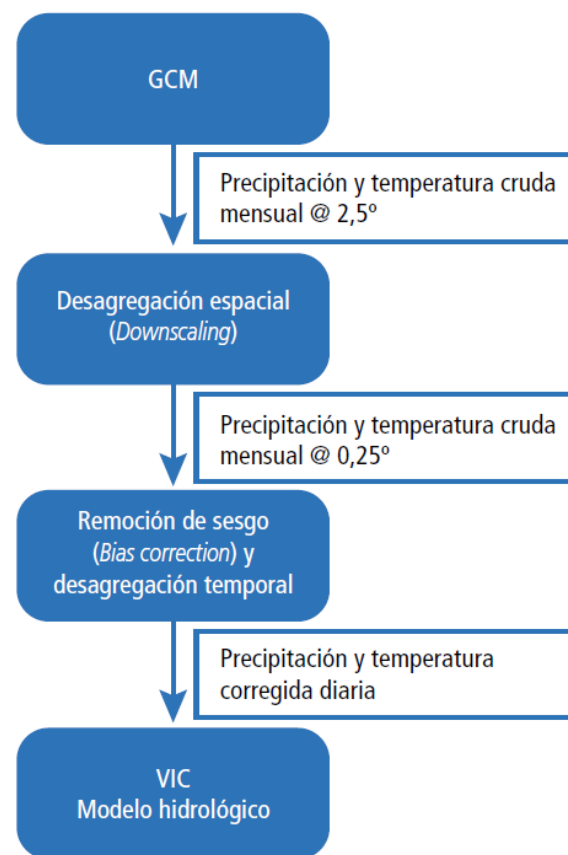


METODOLOGÍA GENERAL

- **4 ETAPAS**
 - Generación de series de tiempo y distribuciones espaciales de temperaturas y precipitaciones.
 - Desagregación espacial
 - Corrección de sesgo y desagregación temporal
 - Simulación de régimen hidrológico utilizando un modelo hidrológico.

Figura 4D.6

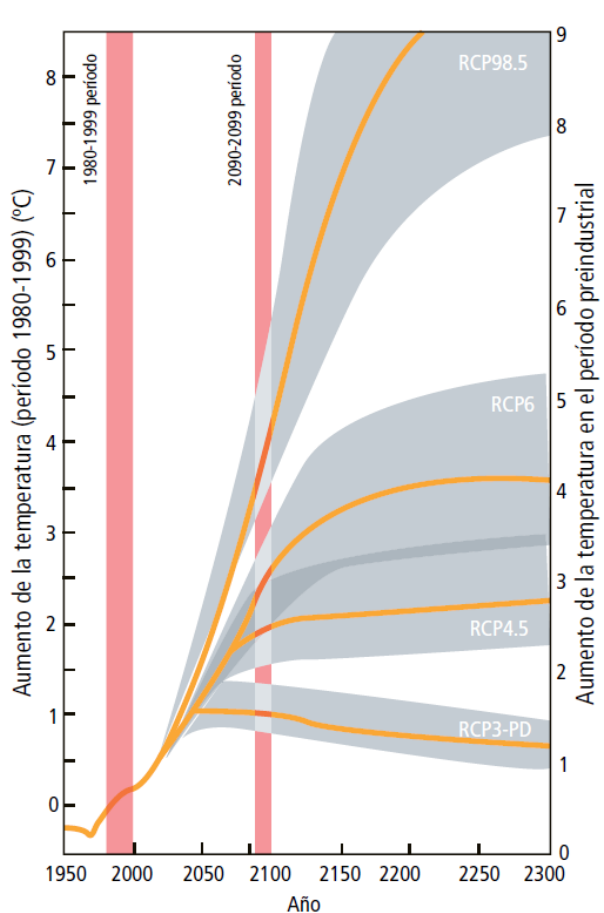
Representación esquemática de los pasos necesarios para utilizar proyecciones climáticas en simulaciones hidrológicas



MODELOS DE CLIMA GLOBAL

Figura 4D.5

Proyecciones de temperatura para cuatro RCP



Fuente: Adaptada de Rogelj et al. (2012).

- Evaluación de 2 escenarios de emisión (RCP, Representative Concentration Pathways):
 - **RCP4.5:** nivel radiativo forzante de 4.5 W/m^2 en el 2100 (~ 650 ppm CO_2 eq.).
 - **RCP8.5:** nivel radiativo forzante de 8.5 W/m^2 en 2100 (~ 1370 ppm CO_2 eq.)
- Se obtienen temperaturas (máximas, mínimas y medias) y precipitaciones a nivel mensual, con resolución 2.5° .

Periodo: 1950-2100
(151 años)

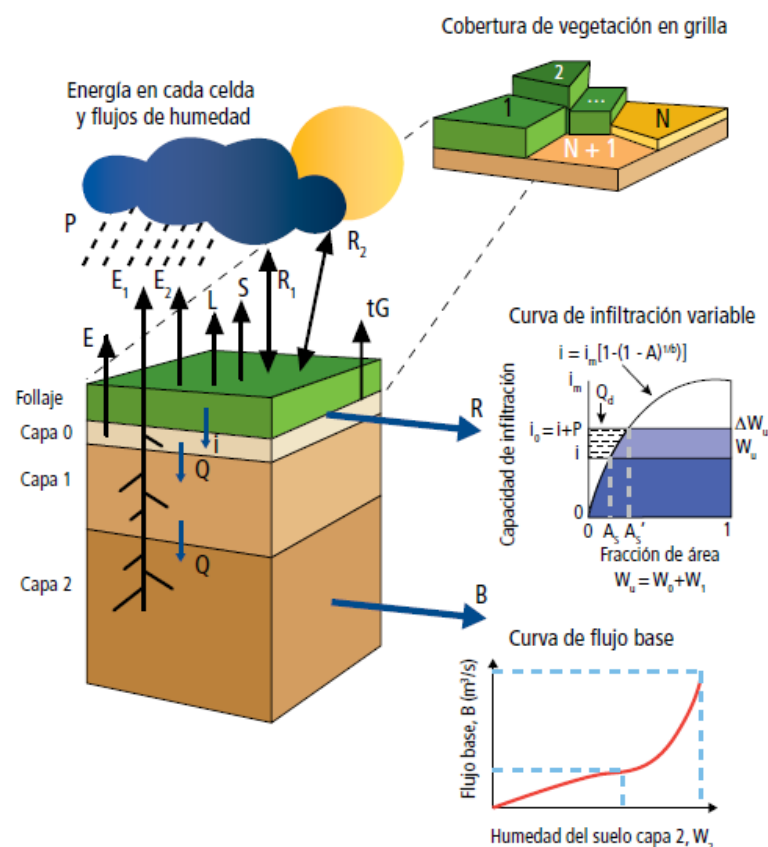
SIMULACIÓN HIDROLÓGICA:

MODELO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY)

- Modelo distribuido.
- Implementable en grandes cuencas.
- Resuelve balance de energía y de masa (acoplable a GCM).
- Posibilidad de variabilidad dentro de la grilla: cobertura de vegetación, humedad del suelo, topografía y precipitación
- Resolución $0,25^\circ$, paso de tiempo diario.
- Variables de entrada: P , T_{\min} y T_{\max} .
- Variables de salida: Q , SWE, ET, humedad del suelo.
- H. unitario para generar Hidrograma
- Eqs. de S. Venant para hidráulica.

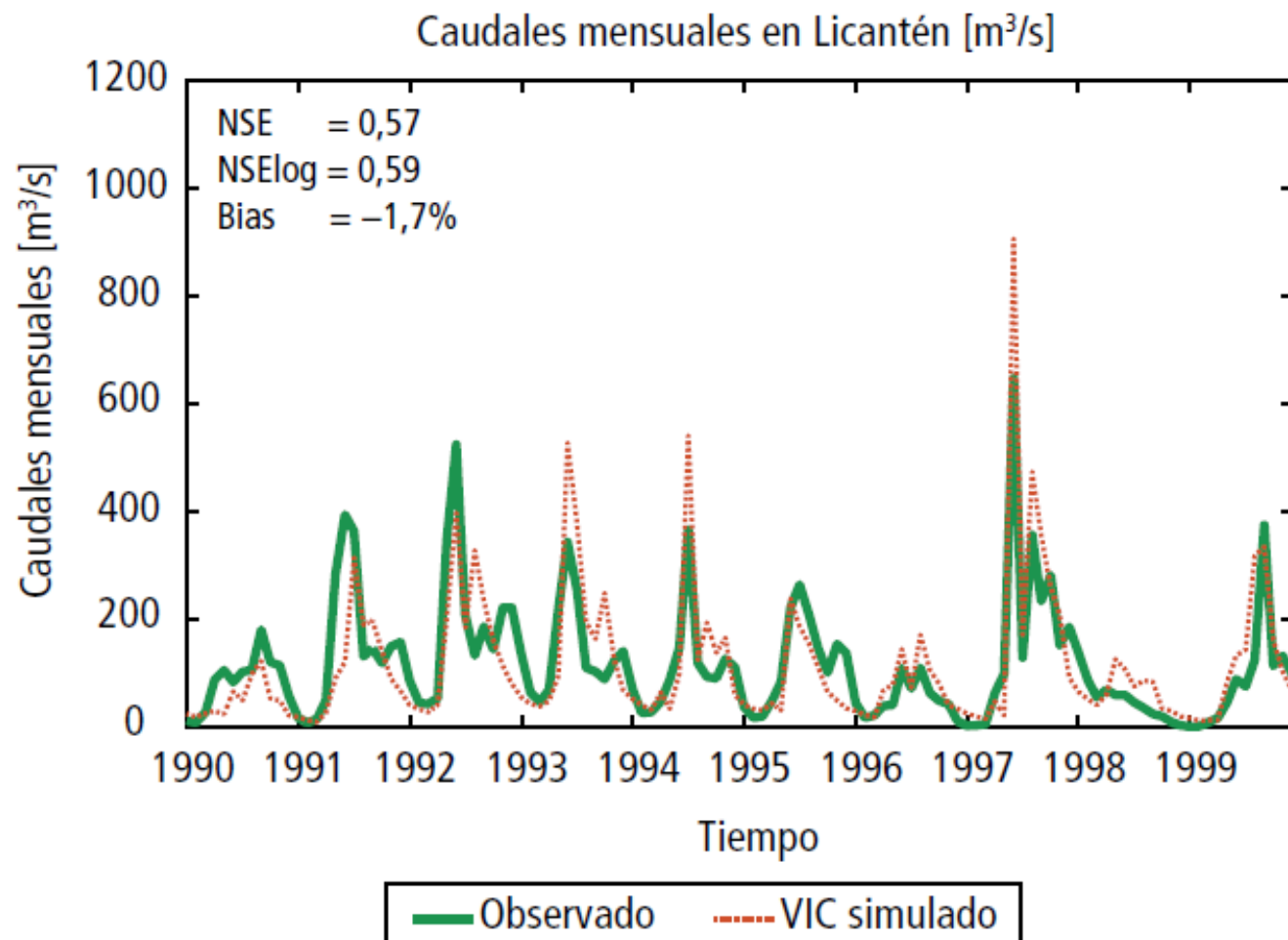
Figura 4D.1

Modelo hidrológico de gran escala



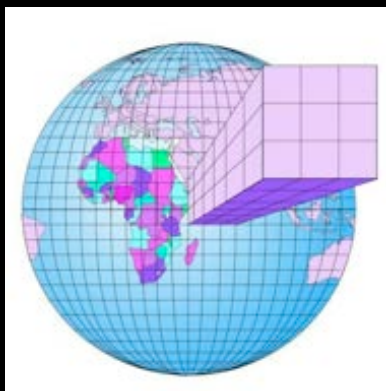
Fuente: Adaptada de Liang et al. (1994).

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA: MODELO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY)

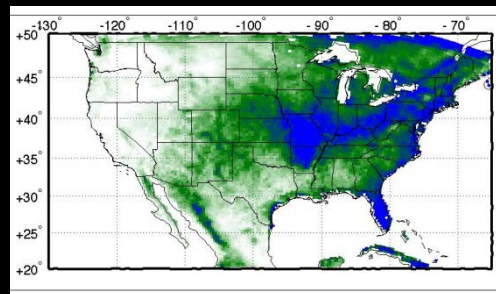


- Ejemplo de modelo calibrado

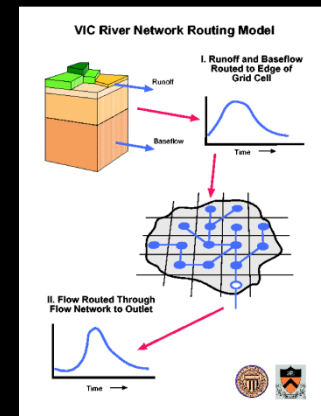
EN RESUMEN...



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

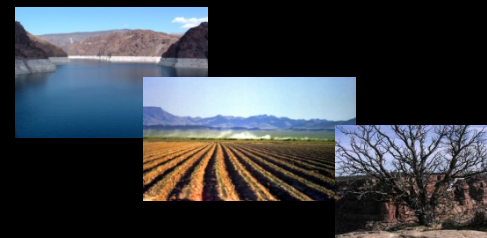


2. Estas proyecciones son escaladas (downscaled) y corregidas espacialmente con métodos estadísticos o dinámicos (resolución 25 km)



3. Campos atmosféricos escalados alimentan el modelo hidrológico VIC

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



PROYECCIONES FUTURAS

Figura 4D.12

Tendencia de precipitación media en la cuenca, simulada mediante GCM

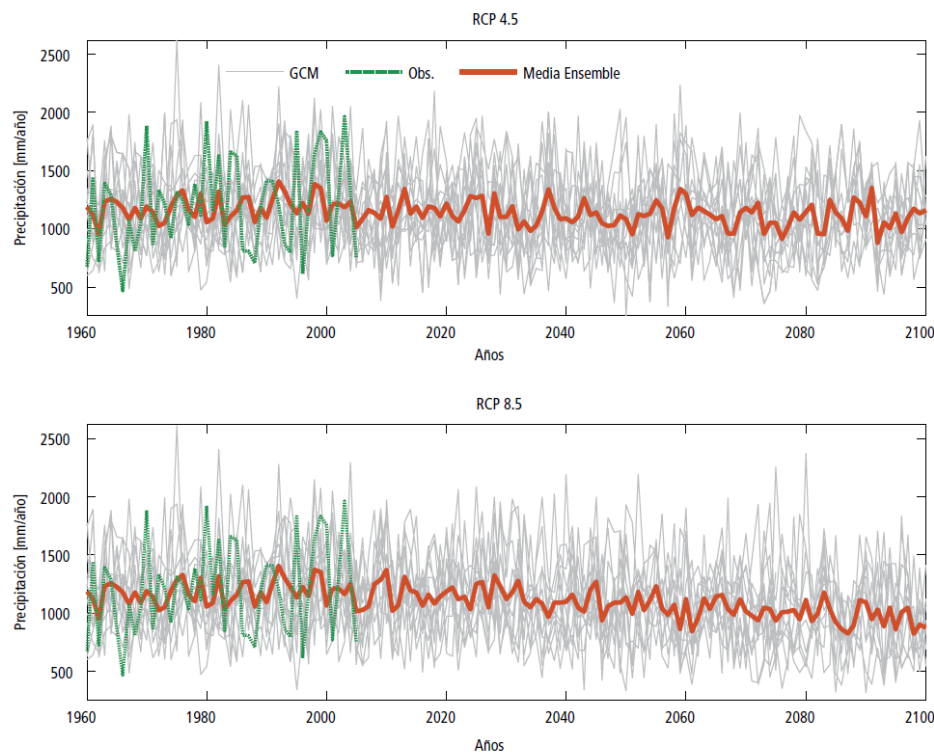
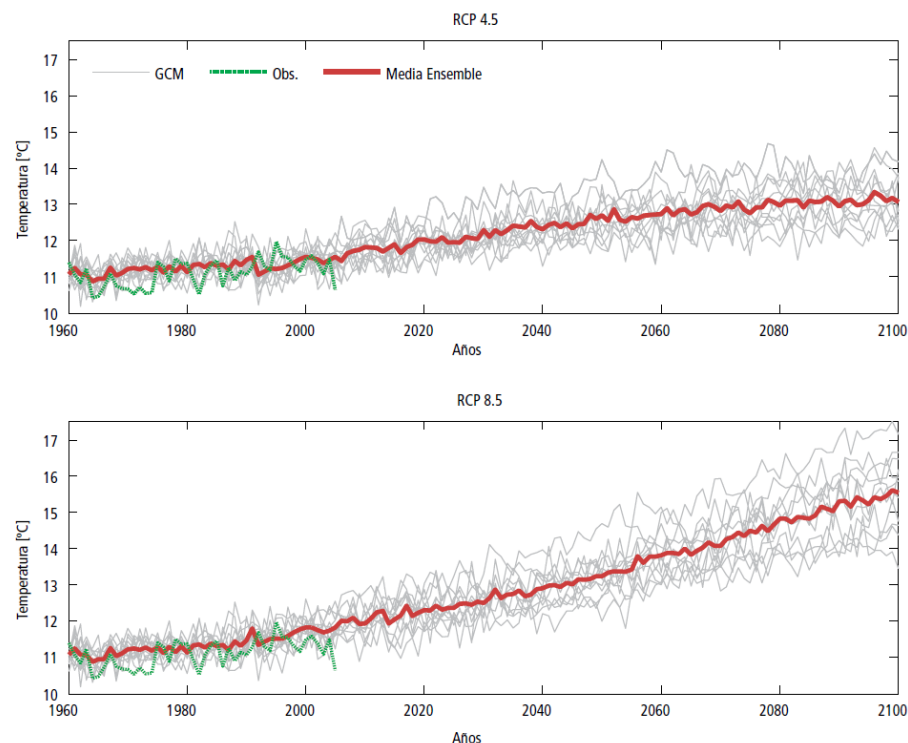


Figura 4D.13

Tendencia de temperatura media anual en la cuenca, simulada mediante GCM



más seco

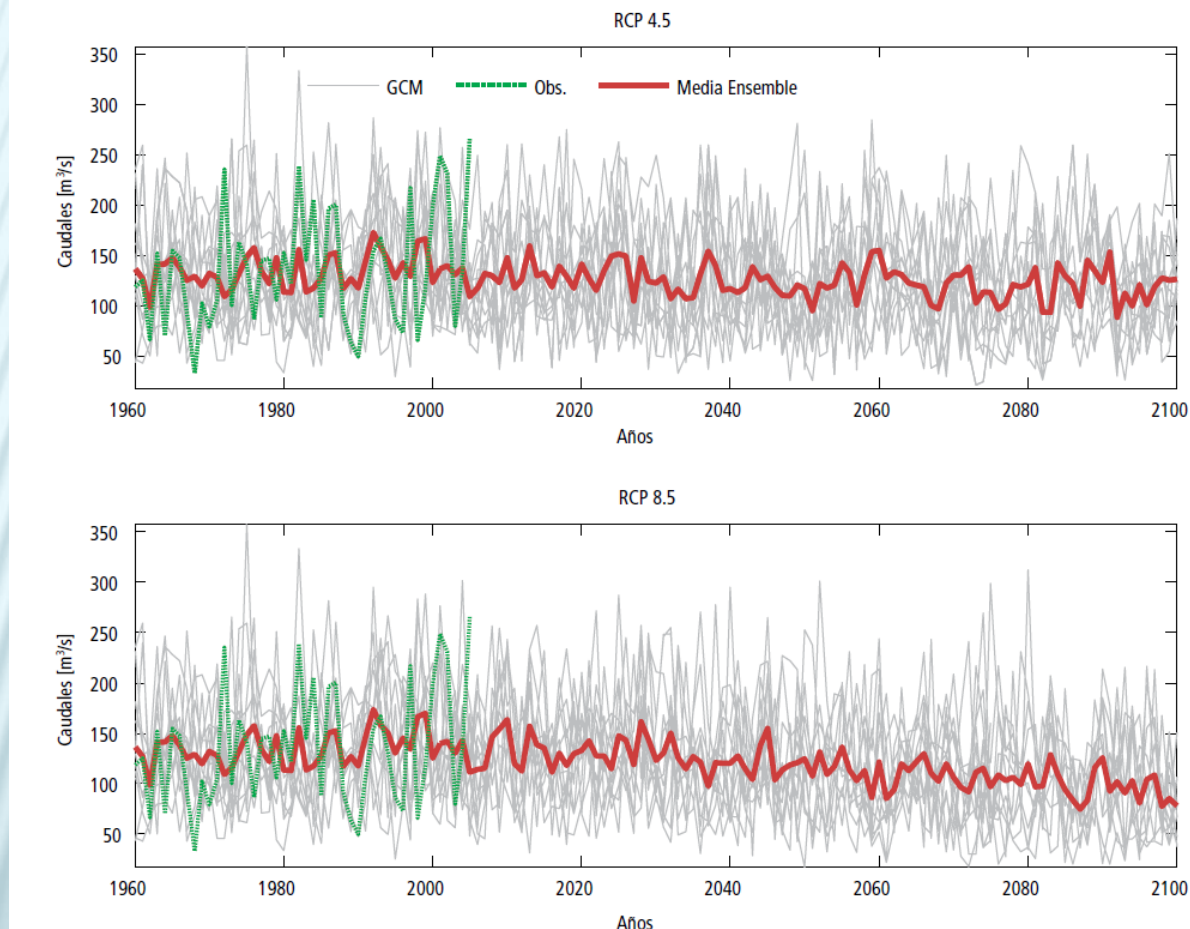
más cálido

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

PROYECCIONES FUTURAS

Figura 4D.14

Tendencia de caudales medios anuales en la cuenca, simulada mediante GCM

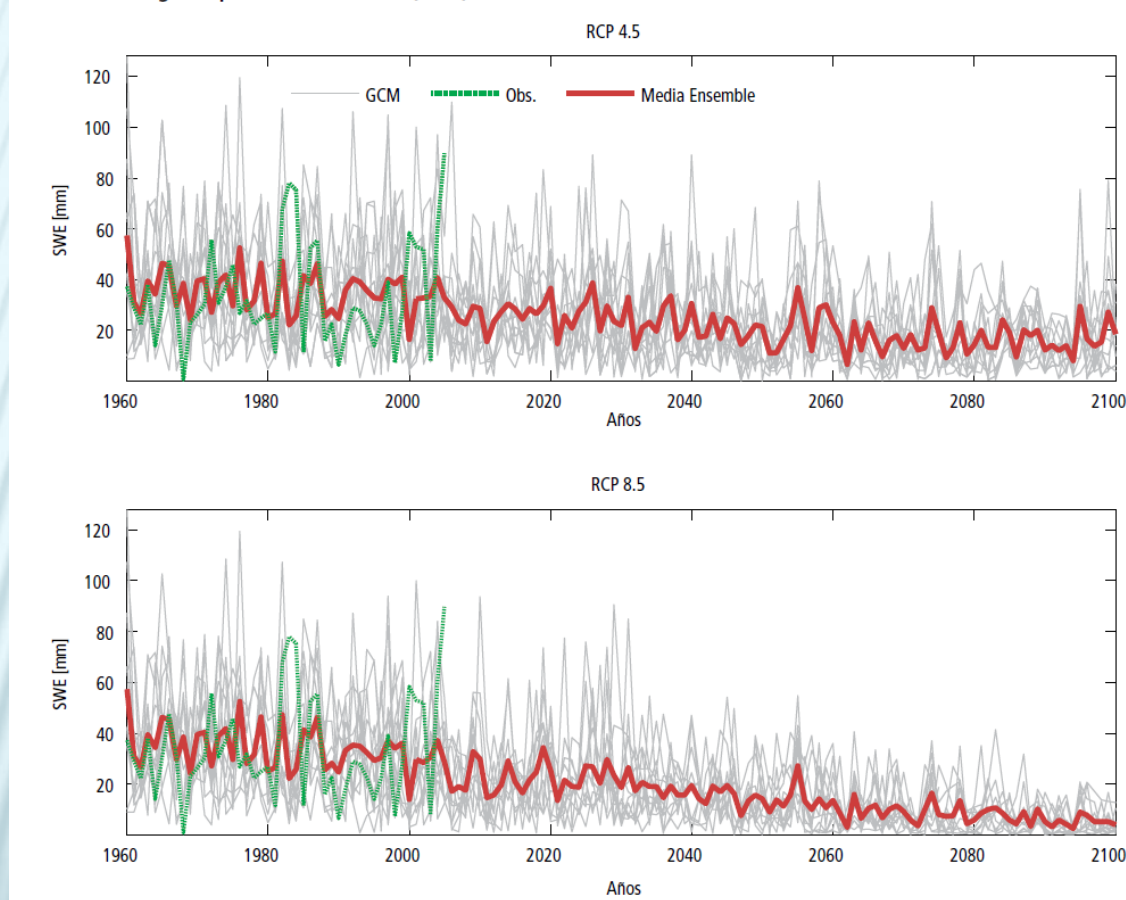


Caudales anuales probablemente disminuirán durante el Siglo XXI.

PROYECCIONES FUTURAS

Figura 4D.15

Tendencia de agua equivalente en nieve (SWE) en la cuenca, simulada mediante GCM



Probable reducción futura de la cobertura de nieve (equivalente de agua líquida) durante los meses de invierno

FUTURAS CRECIDAS

Si bien la tendencia general en caudales es negativa, la intensificación de eventos de lluvia afectaría los caudales máximos

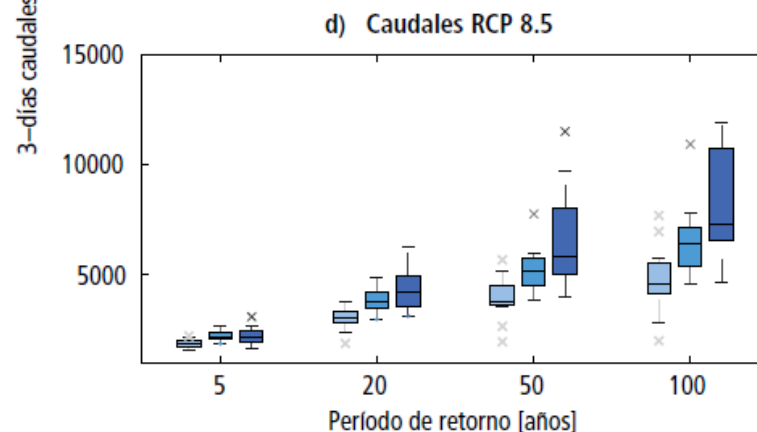
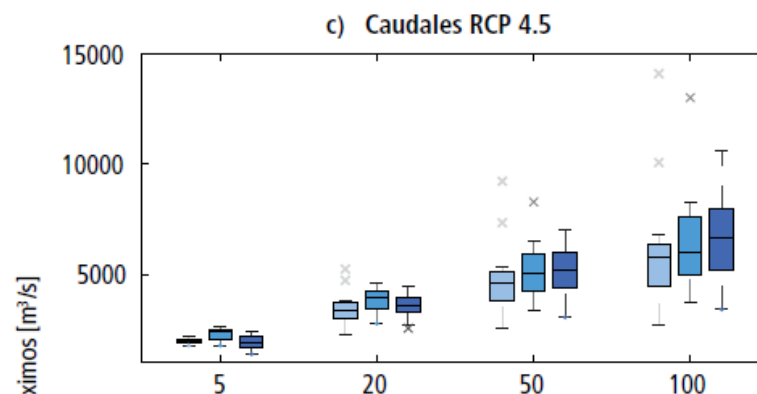
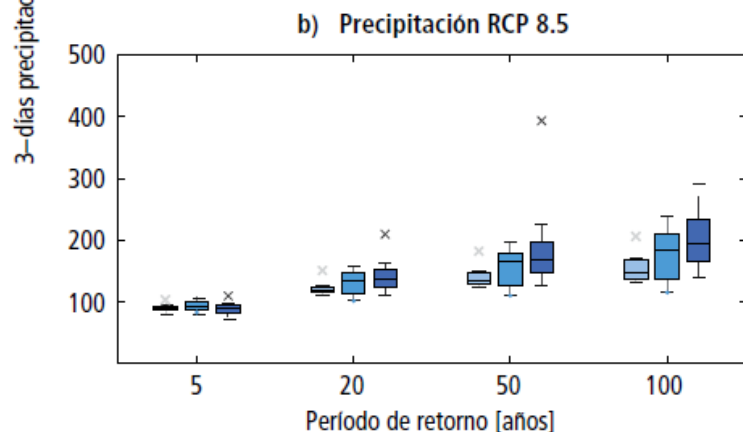
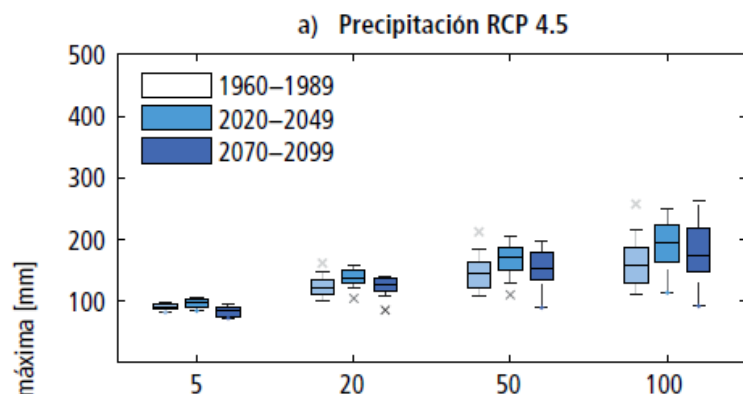
Analisis de frecuencia de caudales

- ✖ Seleccionar 3-días maximos anuales usando medias móviles.
- ✖ Ajustar una función de probabilidad de Valores Extremos Generalizados (GEV).
- ✖ Una alternativa a este enfoque: Distribución con parámetros variables para incorporar tendencias monotónicas (Vogel et al., 2011)

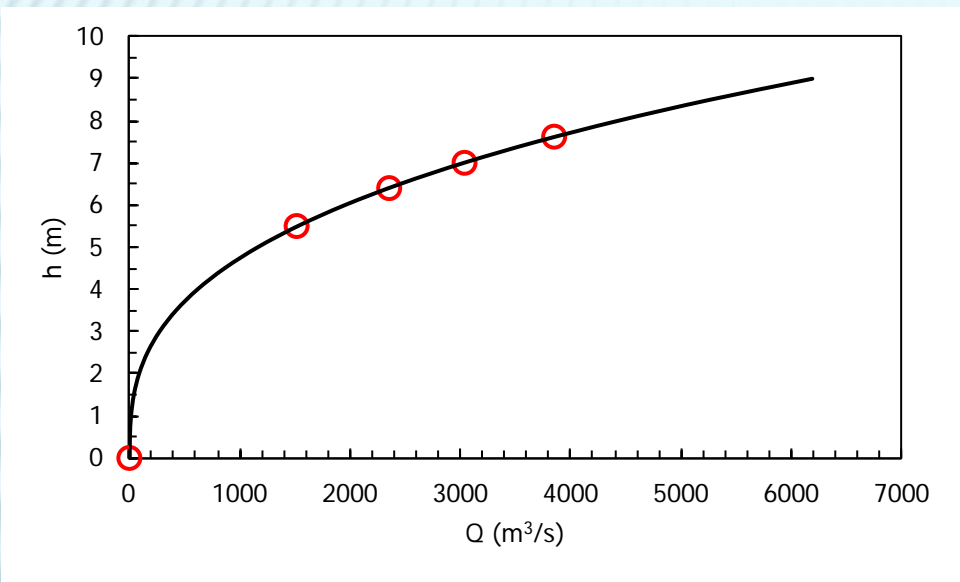
FUTURAS CRECIDAS

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

Máximo anual de precipitación media areal (3-días) para diferentes periodos de retorno usando una distribución GEV



FUTURAS CRECIDAS



	Alerta Azul	Alerta Amarilla	Alerta Roja
Q (m³/s)	1516	2355	3038
H (m)	5.5	6.4	7

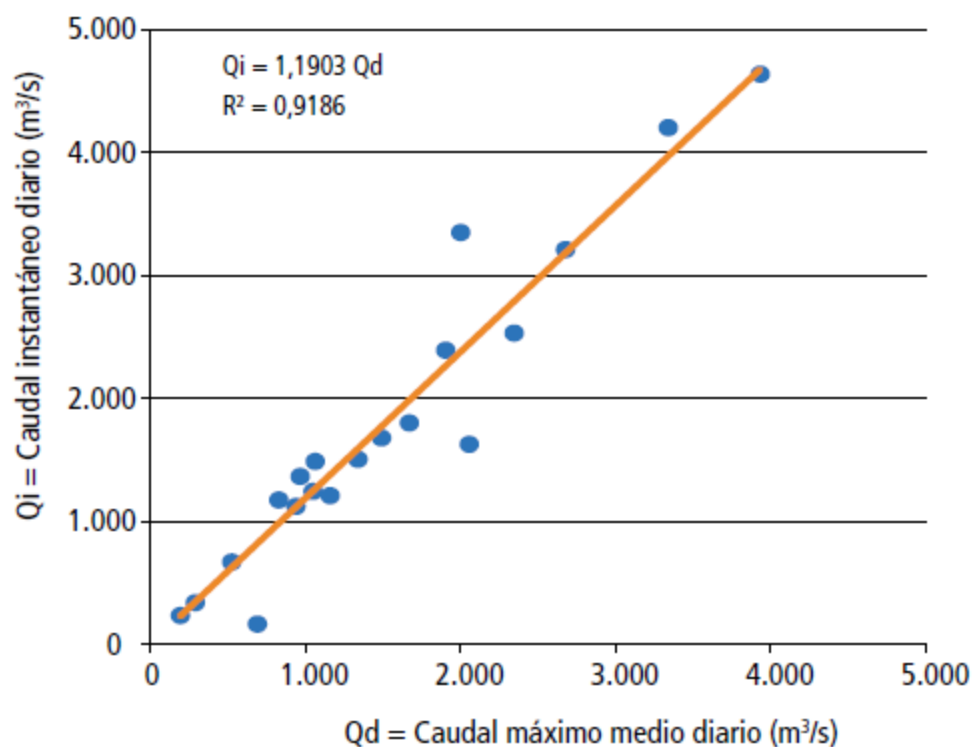
*** DGA (2010), Determinación de los umbrales de alerta de caudales, lluvias y temperaturas del sistema de transmisión de datos de la DGA**

- ❖ 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 m³/s (7.62 m) para la alerta roja.
- ❖ Se requiere evaluar el comportamiento del caudal máximo instantáneo.

FUTURAS CRECIDAS

Figura 4D.17

Relación entre caudales máximos medios anuales y caudales máximos instantáneos en Licantén



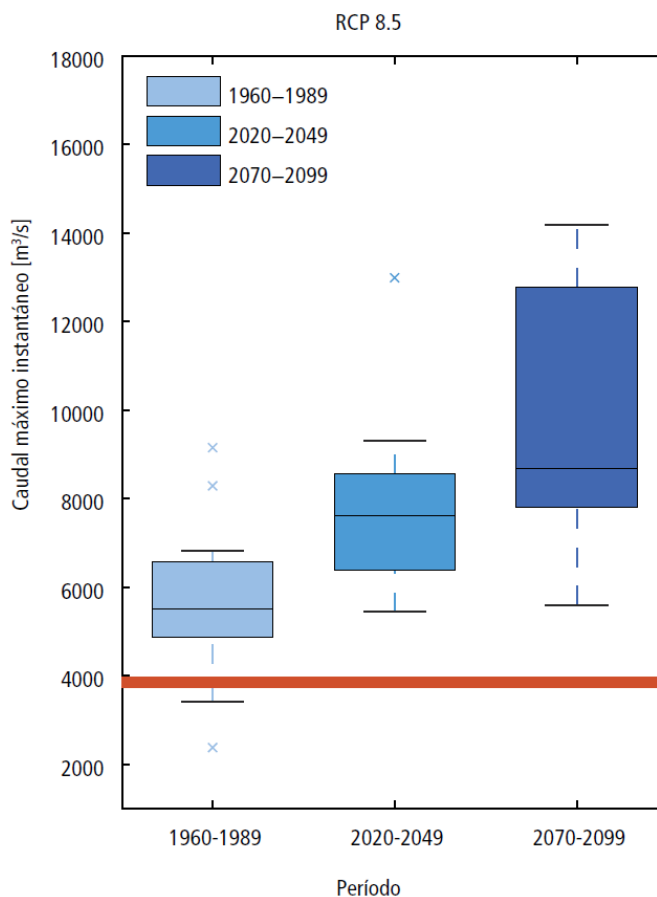
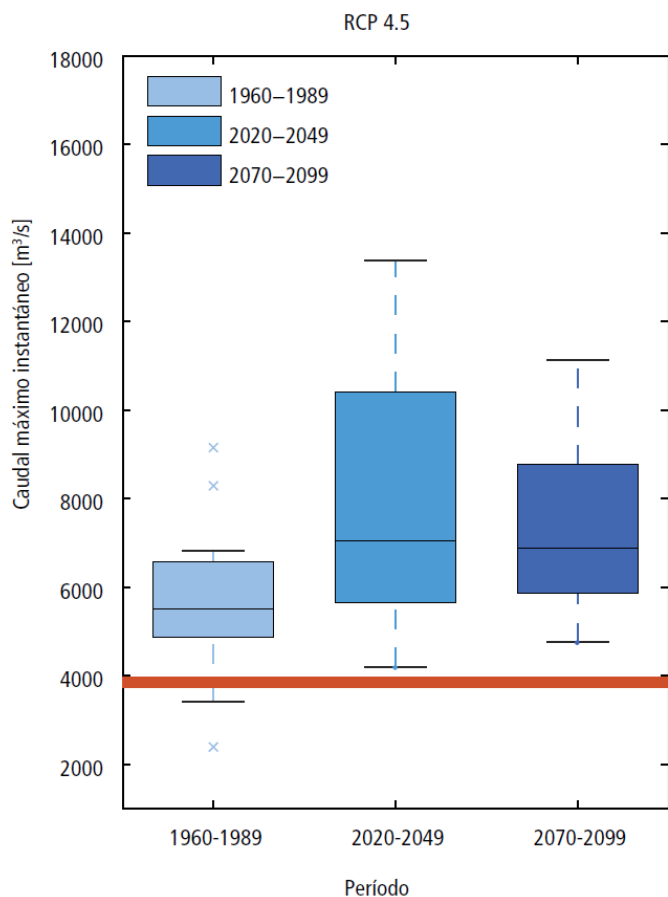
Fuente: Elaboración propia.

Caudales máximos diarios son transformados a caudales instantáneos usando un modelo lineal (McCuen y Beighley, 2003. J of hydrology)

FUTURAS CRECIDAS

Figura 4D.18

Caudal máximo anual instantáneo para una recurrencia de 100 años para el período histórico (1960-1989) y dos períodos futuros (2020-2049 y 2070-2099)

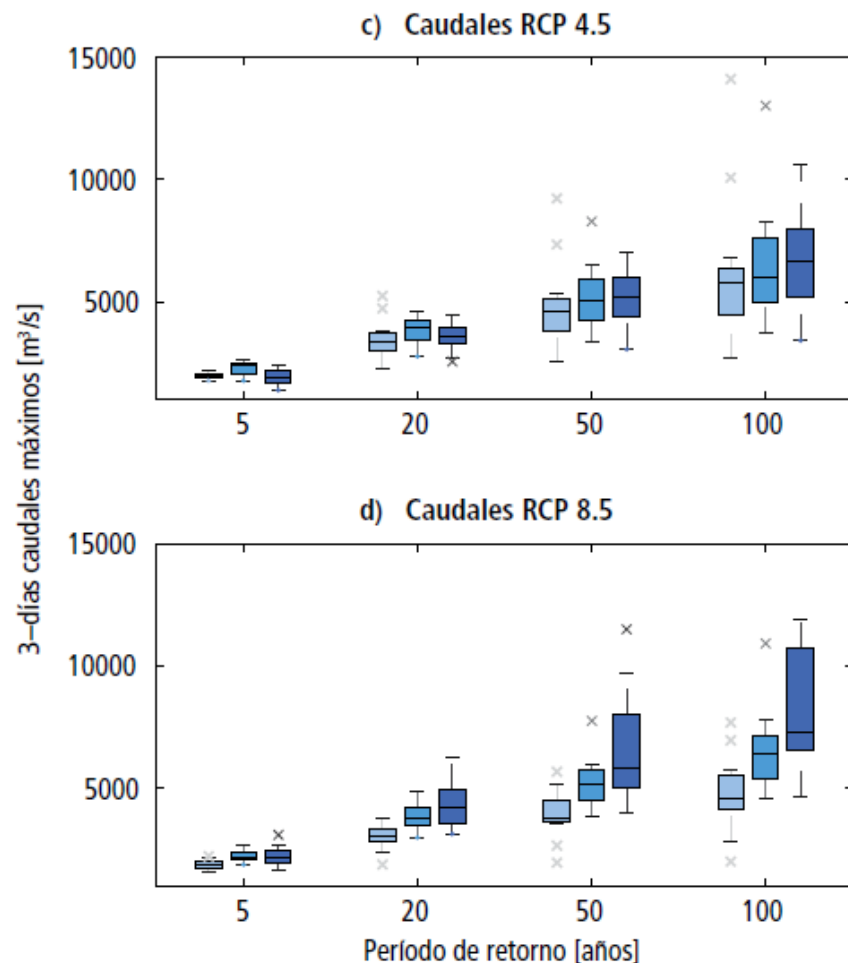


Qmax inst. con T
= 100 años muy
superior al
umbral de alerta
rojo

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La línea roja representa el caudal de Alerta Roja.

EFFECTOS EN EL DISEÑO DE PUENTE



Caudales futuros para T bajos parecen relativamente similar a lo históricamente observado

Lo anterior es menos claro para RCP8.5

Esto afecta el diseño tanto para crecidas extremas como para controlar la socavación.

CONCLUSIONES

- ✖ El consenso de 12 GCMs indica un futuro ligeramente más seco (6-14%) y más cálido (2-3.5 °C) a fines del Siglo XXI.
- ✖ Lo anterior se condice con las tendencias observadas en los últimos 30 años.
- ✖ Se propone una metodología para considerar el efecto de cambio climático en el diseño de puentes a partir de: (1) generación de escenarios climáticos, (2) desagregación espacial y temporal, (3) corrección y remoción de sesgos, (4) simulación hidrológica (VIC).
- ✖ La falta de observaciones de precipitación en la resolución espacial y temporal necesaria para este tipo de análisis es siempre un impedimento. Este trabajo plantea alternativas.

CONCLUSIONES

- ✖ La magnitud de los caudales máximos anuales para T medios y altos muy probablemente se incrementará en el futuro como resultado de tormentas más intensas y mayoritariamente líquidas.
- ✖ 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 se superaría frecuentemente, sugiriendo la necesidad de adaptar el diseño de obras de infraestructura en la región.
- ✖ Tanto el diseño frente a crecidas como a socavación de un puente en este río se vería modificado.