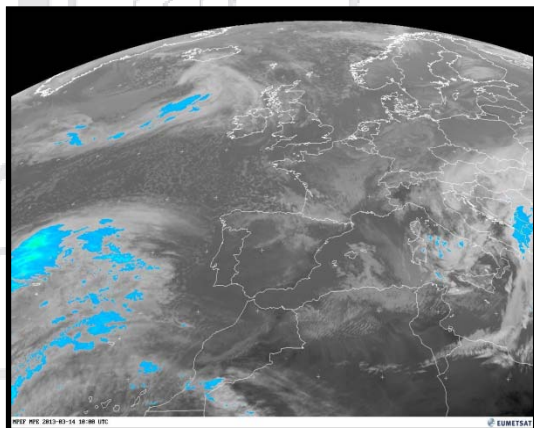


TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MODELACIÓN DEL RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS EN RÍOS DE LA ESPAÑA PENINSULAR EN UN CONTEXTO NO ESTACIONARIO

Autor: Jesús López de la Cruz
(jeslpede@posgrado.upv.es)

Director: Félix Francés García
(ffrances@hma.upv.es)



Acto de defensa pública, Valencia, Octubre 2013



Contenido

1. Introducción
2. Caso de estudio e información
3. Análisis de la estacionaridad
4. Teleconexión: Análisis de correlación
5. Teleconexión: Análisis *wavelet*
6. Modelación no estacionaria
7. Conclusiones y líneas futuras de investigación





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

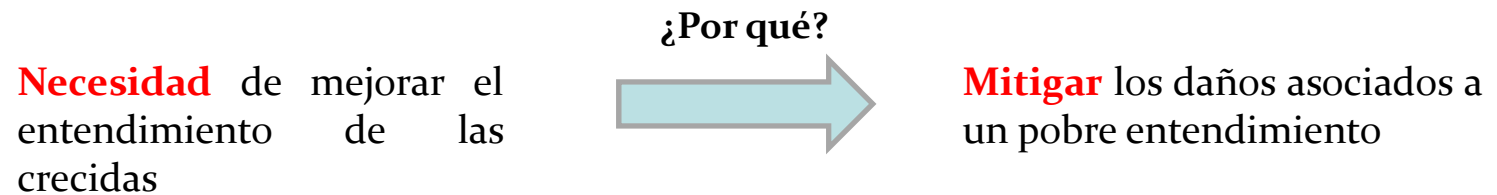
5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Crecidas: son un fenómeno natural de importante interés por su impacto en los ámbitos social, ambiental y económico

El estudio de las crecidas es una de las líneas de investigación principal en la Hidrología



Obtención de las crecidas de diseño

Métodos estadísticos

Métodos hidrológicos

Análisis de Frecuencia de Crecidas (AFC)

- ✓ Método más utilizado en el mundo para el estudio de las crecidas
- ✓ Vincula la **magnitud** de las crecidas con su **frecuencia** de ocurrencia a través del uso de distribuciones de probabilidad (fdp)
- ✓ Aplicación sujeta a dos hipótesis: **las series temporales deben ser independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.)**



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

¡La hipótesis de estacionaridad ha sido la piedra angular en el AFC!



Hemos asumido que cambios en el tiempo debido a las **actividades humanas** o **procesos naturales** no alteran la frecuencia de los eventos

Cambio de paradigma en los últimos años

Mundo estacionario



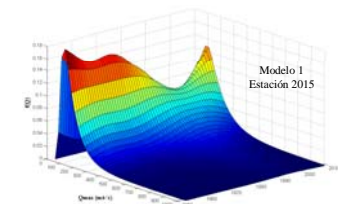
Mundo no estacionario

La metodología cuando se incorpora **no estacionaridad** al modelo requiere una aproximación diferente

La distribución de θ_n y la $F(Y)$



$$F(Y | \theta_n(t))$$



“Aproximar el modelo teórico a la dinámica inherente de los fenómenos en la naturaleza”

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

“Es el concepto que se ha extendido en la formación y práctica en la ingeniería de los recursos hídricos”

Los **forzamientos de la variabilidad climática y de la actividad humana** se han vuelto mas evidentes

¡La estacionaridad a nivel de cuenca se encuentra comprometida!

Hace años.....

“¿Es posible que las oscilaciones climáticas puedan existir solas (sin ningún efecto en alguna otra cosa)?.....Hasta ahora, estamos completamente a oscuras como los esquemas de las observaciones meteorológicas pos si solos no sean determinantes”

Bruckner (1890)

Actualmente.....trabajos recientes han colocado la necesidad de no asumir estacionaridad en las componentes del ciclo hidrológico a la vanguardia de las ciencias hidrológicas

“La estacionaridad esta muerta.....y no debe ser revivida”

Milly et al., (2008)

¿Estacionaridad: quiere morir o quiere vivir?

Lins and Cohn (2011)

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

En la literatura diversas aproximaciones de modelos no estacionarios:

Modelos no estacionarios en su mayoría asumiendo **tendencias temporales**

(Olsen et al., 1998; McNeil and Saladin, 2000; Stedinger and Crainiceanu, 2001; Strupczewski et al., 2001b; Renard et al., 2006; Yi et al., 2006; Leclerc and Ouarda, 2007; Delgado et al., 2010)

Problemas: las tendencias pueden cambiar a corto y a largo plazo producto de la variabilidad climática y la intensificación de las actividades antrópicas

Alternativa planteada: incorporar forzamientos externos como covariables (Khaliq et al., 2006)



Ante la alternativa actual.....

✓ Influencia de la variabilidad climática en el comportamiento de los ríos

ENSO el fenómeno de macroescala mas utilizado (Katz et al., 2002; Sankarasubramanian and Lall, 2003; El Aldouni et al., 2007; Kwon et al., 2008; Aissoui-Fqayeh et al., 2009; Ouarda and El-Aldouni, 2011)

✓ Impacto de factores de origen antropogénico

Pocos estudios han incorporado factores de origen antropogénico como covariables en la modelación de la frecuencia de las crecidas (Moglen 2003; Villarini et al., 2009; Gilroy and McCuen 2012)



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

El impacto de la **variabilidad climática** en las componentes del ciclo hidrológico uno de los temas relevantes en la Hidrología

Escalas de la variabilidad climática:

Escalas espaciales:

- Tormenta
- Mesoescala
- Sinóptica
- Macroescala**

Escalas temporales:

- Diurna
- Intranual
- Anual
- Interanual**
- Interdecadal**, etc.

El conocimiento de las relaciones entre el clima y las variables hidrológicas no es nueva

Dificultad:

Complejas interrelaciones con múltiples variables

Avances en la climatología sinóptica:

Identificación de fenómenos de macroescala que caracterizan la variabilidad climática de baja frecuencia (interanual e interdecadal)

Diversos estudios han evidenciado el impacto de la variabilidad climática en la Península Ibérica (Martín-Vide and Fernández, 2001; De Luis et al., 2005; Gallego et al., 2005; López-Bustins et al., 2008; Trigo et al., 2004; López et al., 2006; Morán et al., 2010)



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación


5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

✓ En el análisis de frecuencia, los datos deben generalmente ser independientes e idénticamente distribuidos (iid), lo que implica que deben cumplir con los criterios estadísticos de independencia, homogeneidad y estacionaridad

✓ Toda la infraestructura hídrica ha sido diseñada bajo el supuesto de un sistema estacionario

✓ En realidad, la distribución de probabilidad de eventos extremos puede cambiar con el tiempo  forzamiento de la variabilidad climática natural y la intensificación de las actividades antropogénicas

✓ Necesidad de emplear modelos estadísticos capaces de reproducir la variación temporal de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad

En los últimos años las investigaciones en el AFC se han centrado de manera dominante en modelar la frecuencia de crecidas en un contexto **no estacionario**



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Objetivo principal

Modelar los regímenes de crecidas en ríos de la España peninsular bajo condiciones de no estacionaridad.

Objetivos particulares

- ✓ Revisión acerca de la influencia de los fenómenos de macroescala en las variables hidrológicas en la España peninsular
- ✓ Revisión de los diferentes modelos no estacionarios
- ✓ Examinar la hipótesis de estacionaridad en el régimen de crecidas en ríos de la España peninsular
- ✓ Evaluar la teleconexión entre el régimen de crecidas y las variables macroclimáticas
- ✓ Incorporar los efectos de la variabilidad climática natural y los embalses en la modelación de los regímenes de crecidas asumiendo diversas alternativas de modelos



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

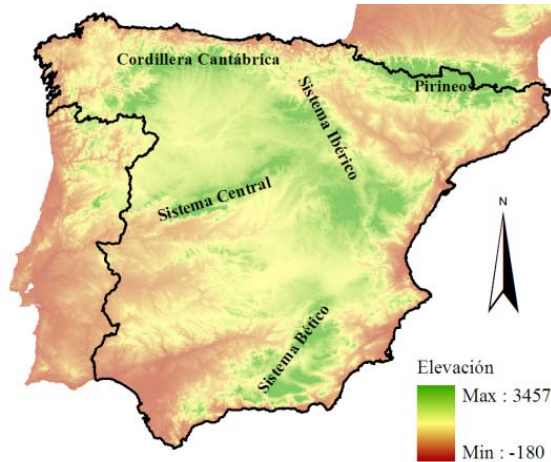
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

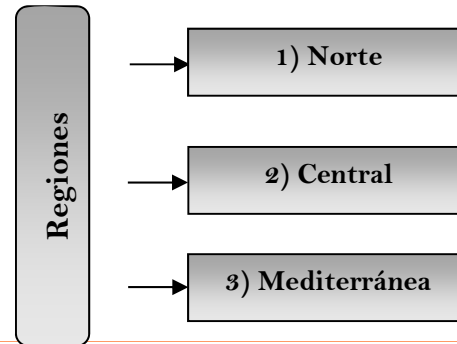
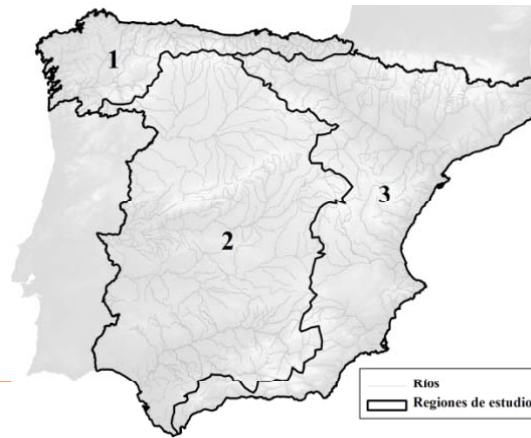
7. Conclusiones

La Península Ibérica se encuentra en una región meteorológicamente compleja representando uno de los casos más extremos de variabilidad climática dentro de Europa.



- ✓ La España peninsular ocupa el 84% de la PI
- ✓ La precipitación anual varía de 300 mm/año en la costa y regiones semidesérticas en el sureste a 2000 mm/año en regiones del noroeste
- ✓ Distribución estacional de la precipitación (Rodríguez-Puebla et al., 1998)
 - 33% invierno
 - 26% primavera
 - 12% verano
 - 29% otoño
- ✓ Los regímenes de precipitación
 - Variabilidad interanual
 - Irregularidad en las dimensiones espaciales y temporales

División de la zona de estudio



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

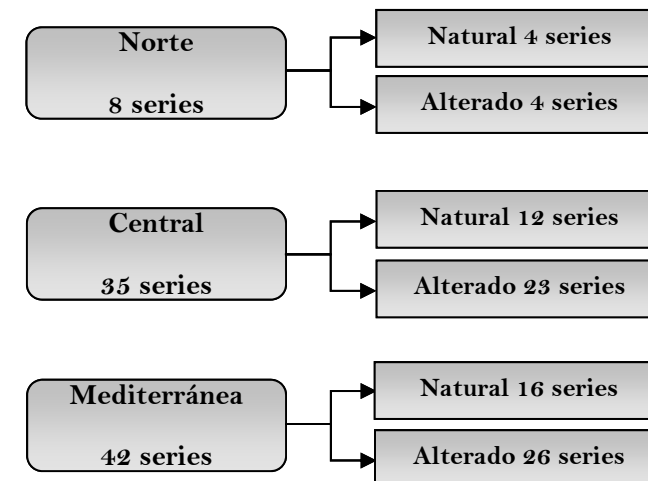
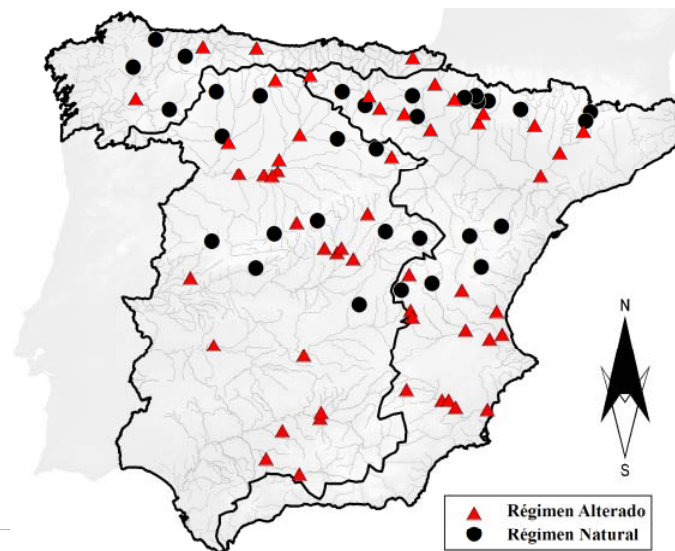
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- Series temporales de caudales obtenidas de la base de datos del CEDEX
- Estaciones de aforo con al menos 50 años de registro hasta el año 2008
- 85 estaciones de aforo distribuidas a lo largo de la España peninsular
 - ✓ 32 estaciones en régimen natural
 - ✓ 53 estaciones en régimen alterado
- Se trabaja con años hidrológicos
- Periodo común de 56 años (1952-2007)





Información climática: Fenómenos de macroescala

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Los patrones de variabilidad de baja frecuencia con unas de las causas internas más relevantes de la variación del sistema climático.

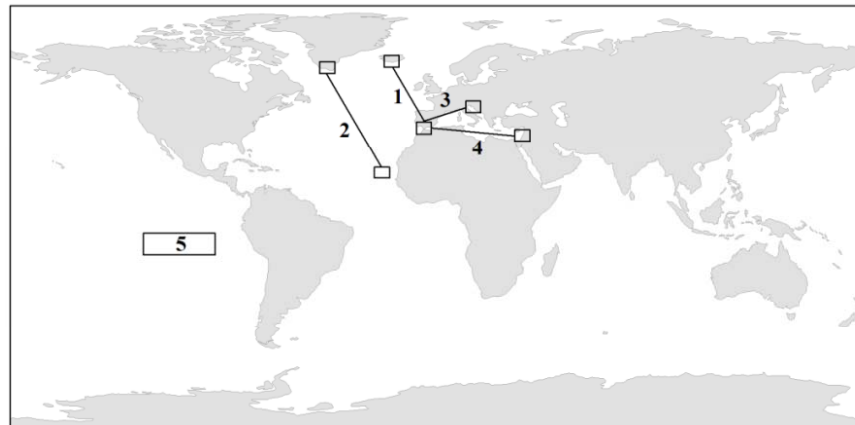
Ayudan a entender la **variabilidad climática** en un amplio rango de **escalas espaciales y temporales**.

La evolución temporal de estos fenómenos es descrita a través de valores cuantitativos.

Índices estandarizados



Definidos con base a estudios de teleconexión entre las mediciones de parámetros meteorológicos (presiones o temperaturas a nivel del mar)



1. Oscilación del Atlántico Norte (NAO)¹

2. Oscilación Ártica (AO)²

3. Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO)³

4. Oscilación del Mediterráneo (MO)¹

5. ENSO (Niño 3.4)²

(1) <http://www.cru.uea.ac.uk/>

(2) <http://www.cpc.noaa.gov>

(3) <http://www.ub.edu/gc/English/wemo.htm>



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

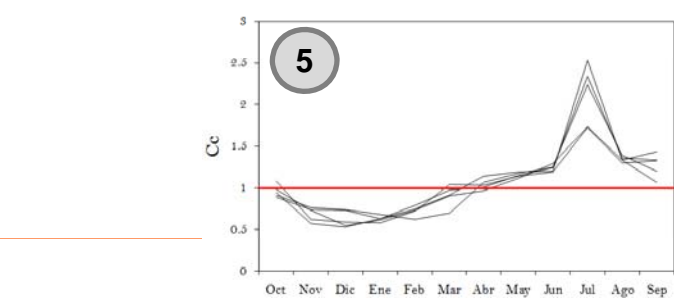
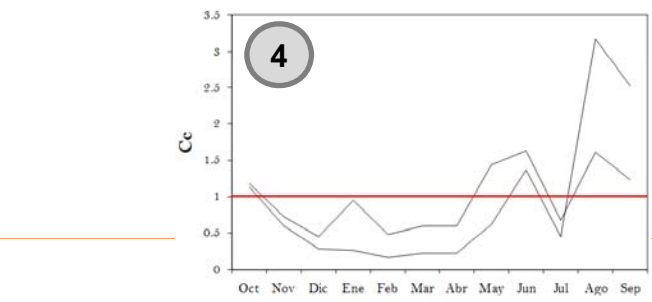
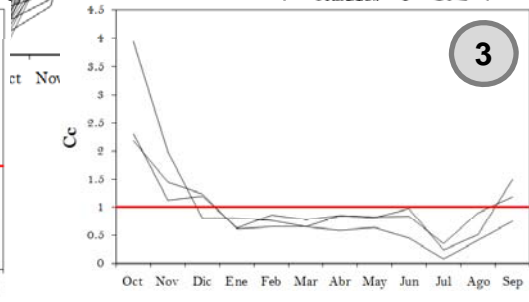
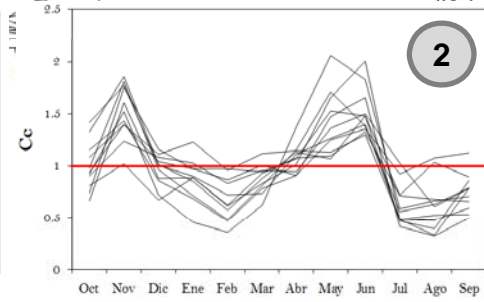
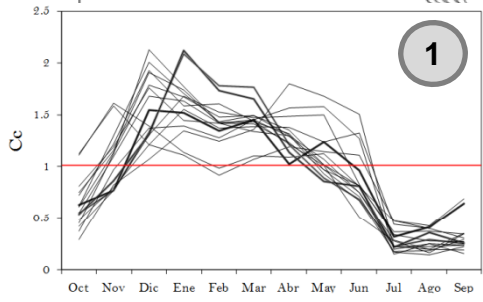
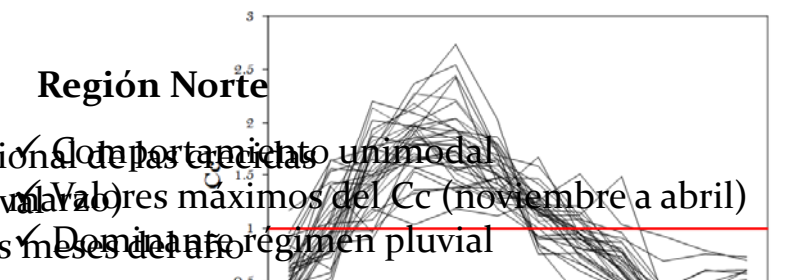
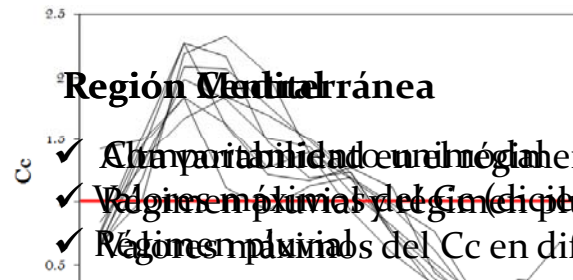
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- Clasificación basada en el Coeficiente de Caudal (Cc)
- Marcadas diferencias entre las estaciones de aforo en cuencas vertientes al Atlántico y las vertientes al Mediterráneo



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

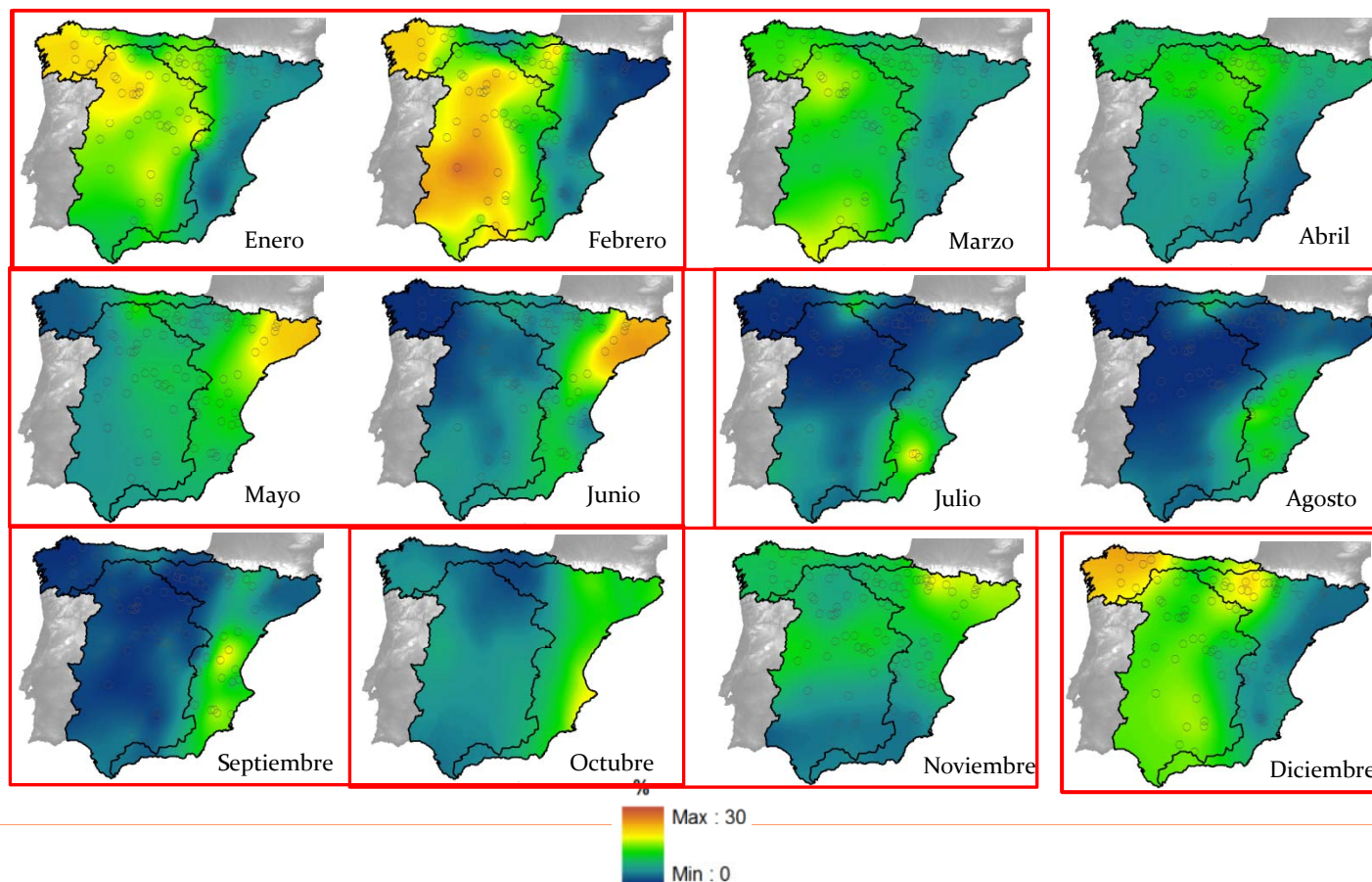
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- ✓ Mayor frecuencia de eventos máximos en las regiones Central y Norte ⇒ **diciembre a marzo**
- ✓ Marcada heterogeneidad en la frecuencia de eventos máximos en la región Mediterránea
 - Parte alta interior ⇒ **diciembre a febrero**
 - Sur ⇒ **julio a octubre**
 - Noroeste ⇒ **mayo a junio y octubre a noviembre**





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Como respuesta a la irregularidad en la distribución espacio-temporal de los recursos hídricos en España, en la últimas décadas se llevó a cabo una política de construcción de un gran número de embalses reguladores.

Perturbaciones causadas por los embalses.....

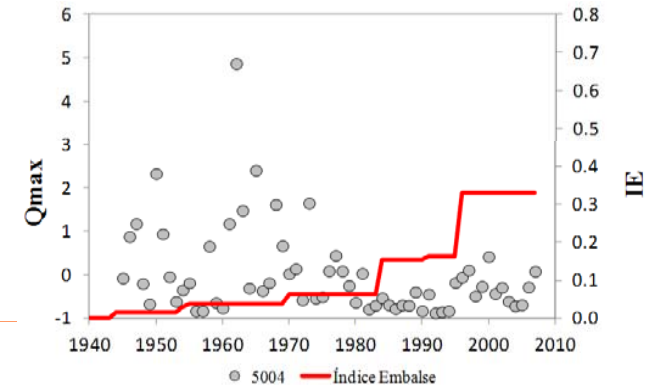
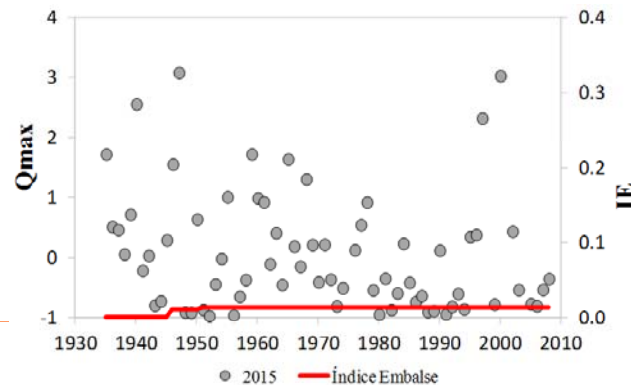
- ✓ Cambios y reducción del flujo total
- ✓ Incremento o disminución de los flujos base durante los meses de verano
- ✓ Alteración en el calendario de las descargas

Los impactos de los embalses son más pronunciados en cuencas con climas secos.....

- ✓ Mayores necesidades de almacenamiento
- ✓ Gran capacidad de los embalses

Propuesta de un índice de embalse (IE):

$$IE(t) = \sum_{i=1}^n \frac{S_{E_i}(t)}{S_S} \cdot \frac{C_{E_i}(t)}{Ve} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

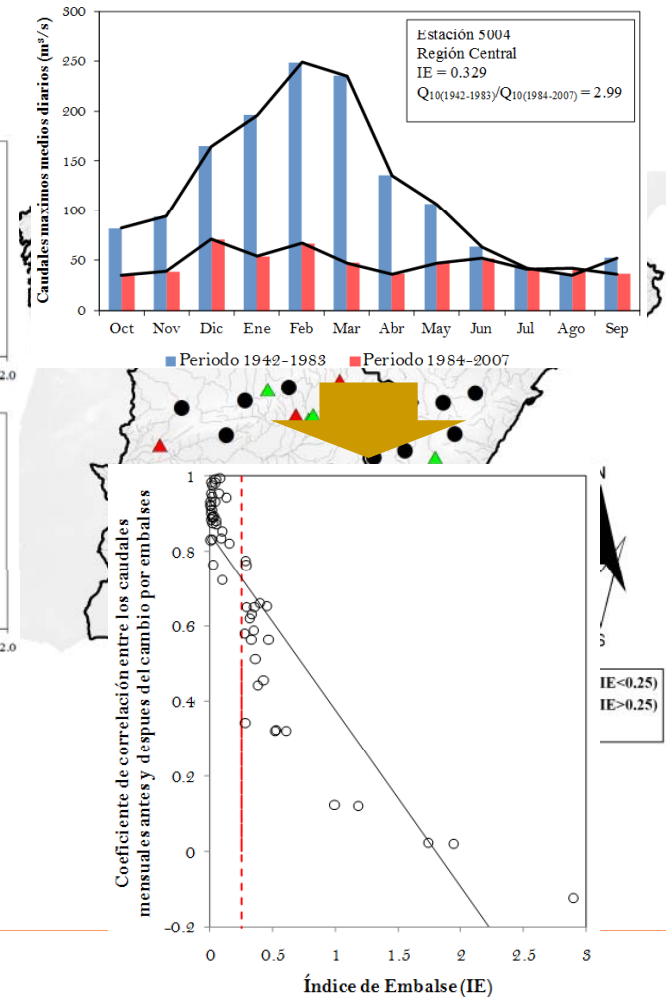
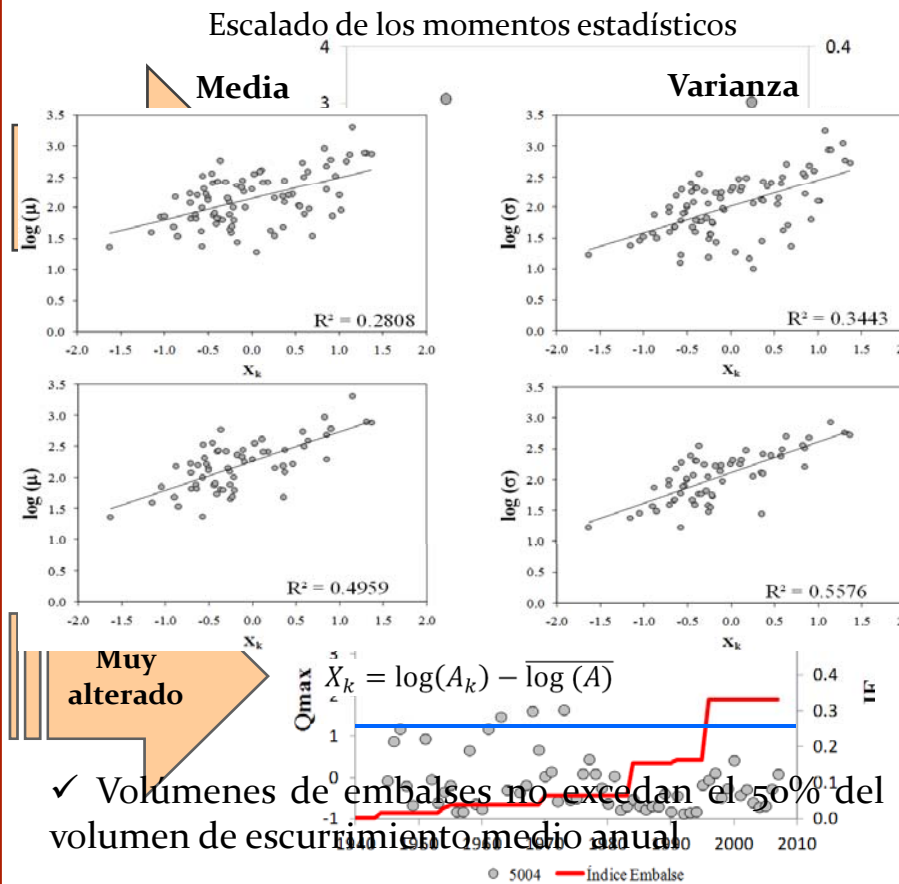
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Identificación del grado de alteración en los sitios de estudio



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

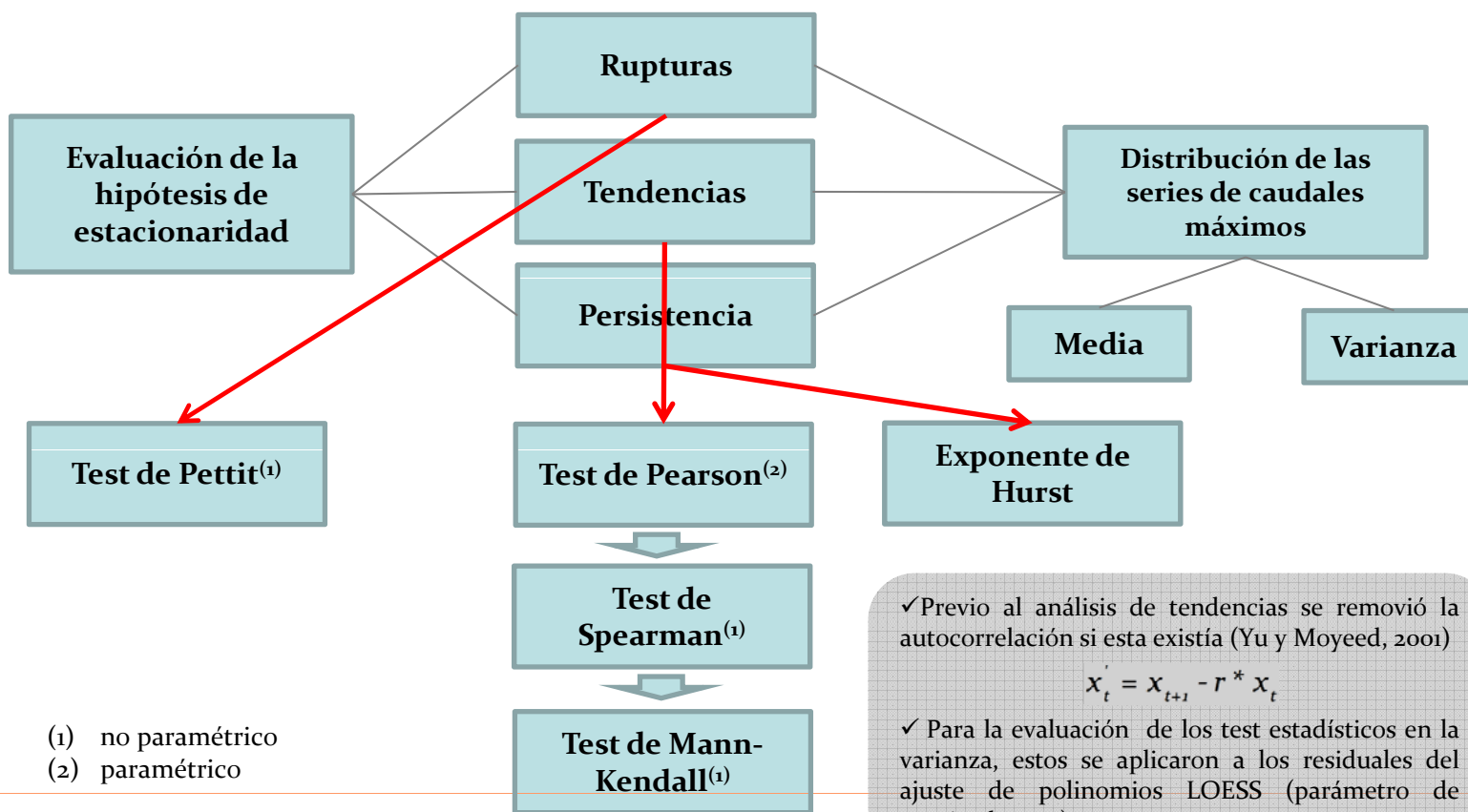
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Las series temporales son estacionarias si la distribución es invariante bajo traslaciones en el tiempo.....**es decir que tienen que estar libres de tendencias y cambios abruptos** (Salas, J., 1993; Matalas, 1997; Koutsoyiannis, 2006)





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

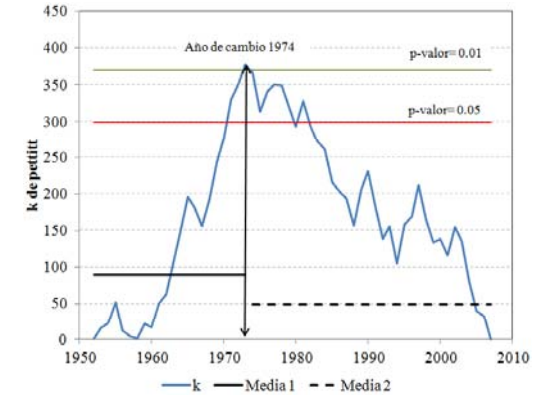
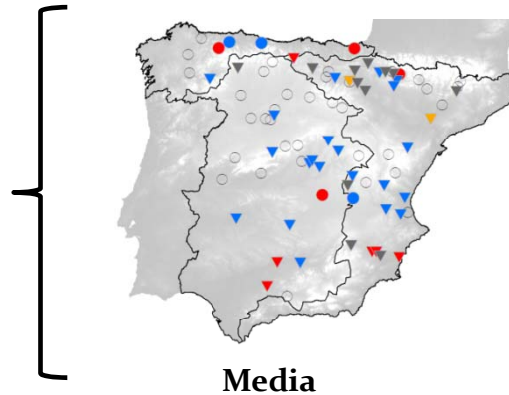
7. Conclusiones

Series de máximos anuales

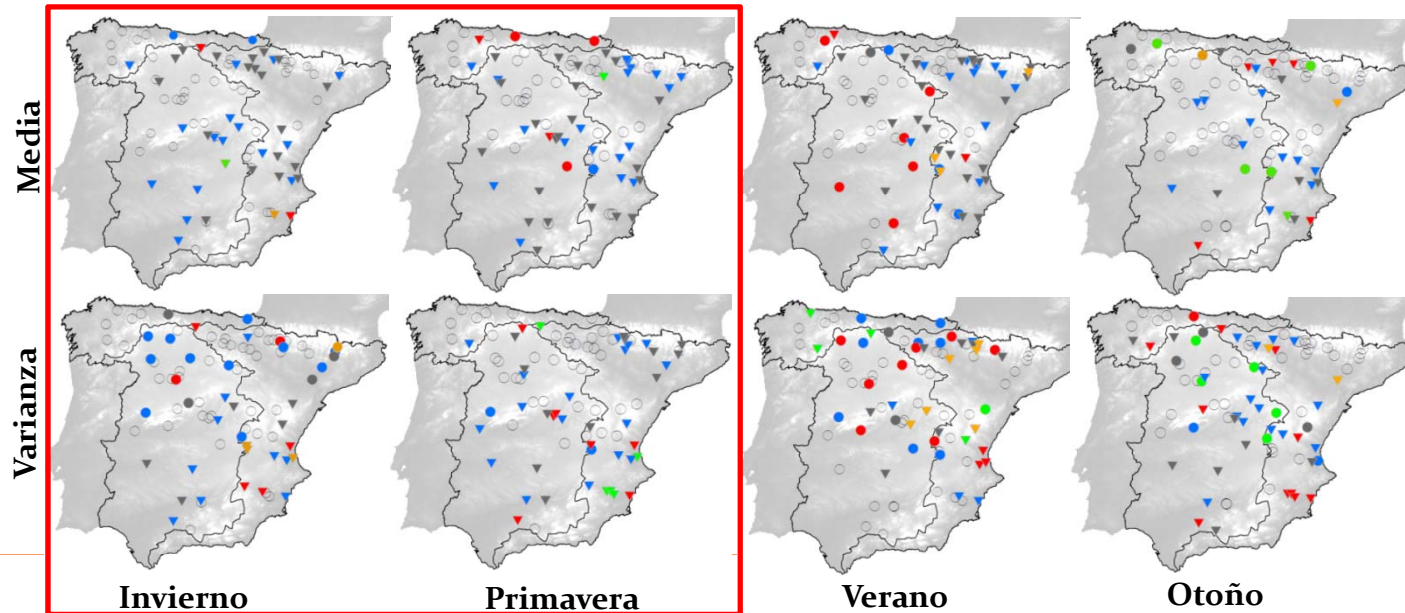
- ▼ Decreciente
- Creciente

▼	●	1950's	▼	●	1980's
▼	●	1960's	▼	●	1990's
▼	●	1970's	○		No ruptura

* Correlaciones significativas para un nivel de confianza del 95%



Series de máximos estacionales





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

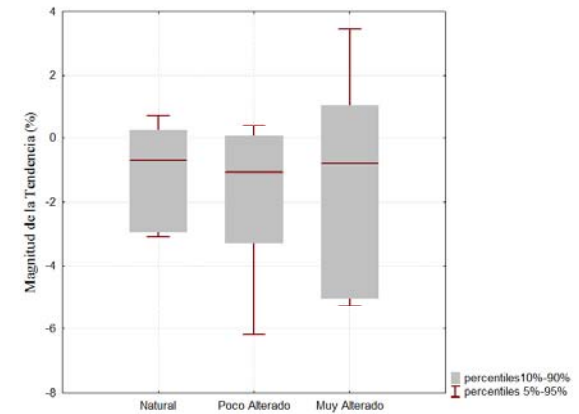
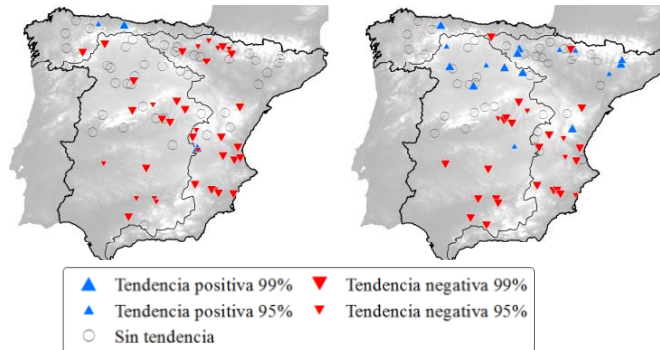
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

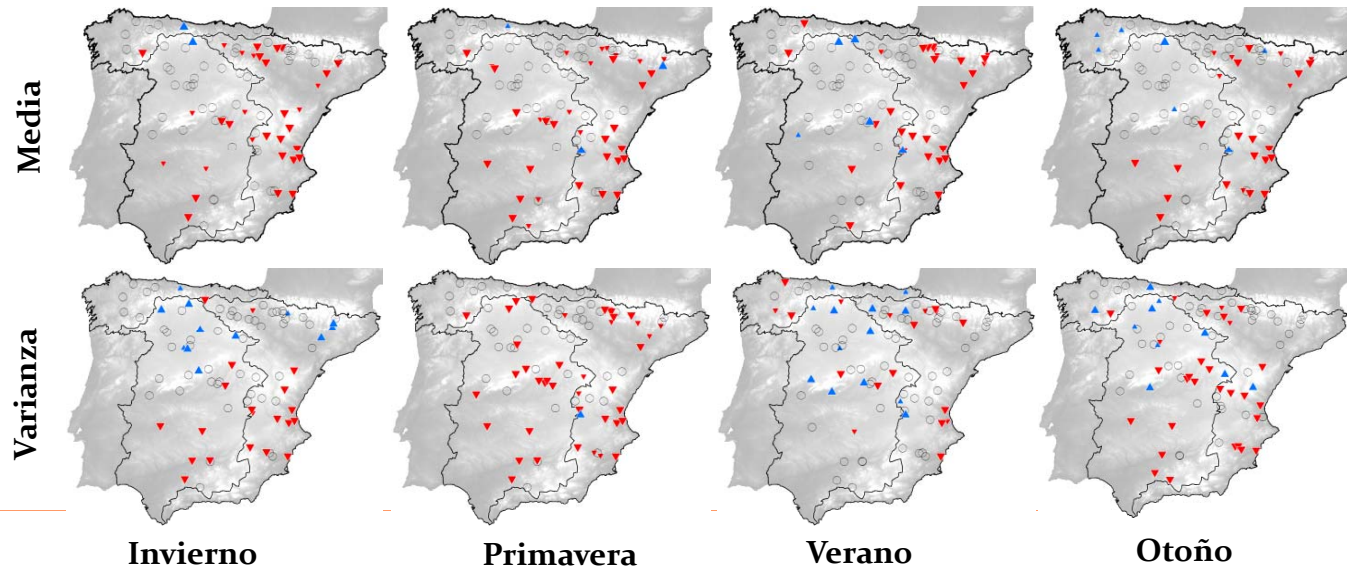
6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Series de máximos anuales (Mann-Kendall)



Series de máximos estacionales (Mann-Kendall)





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

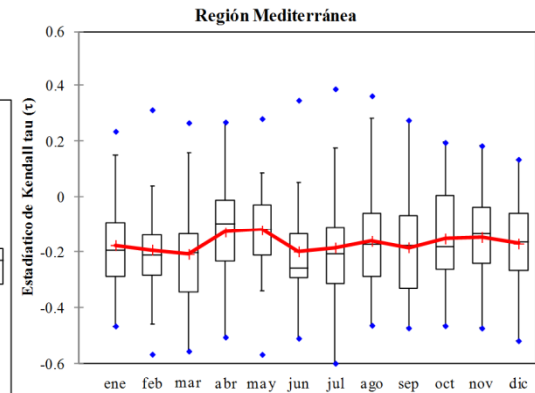
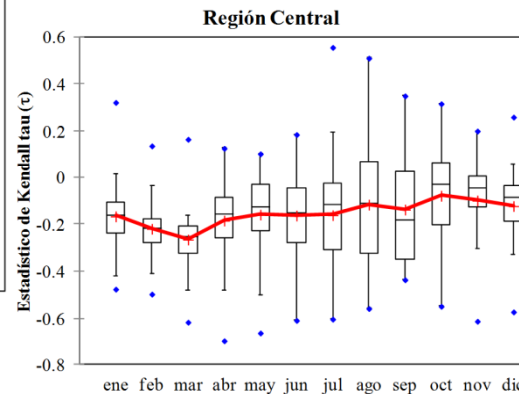
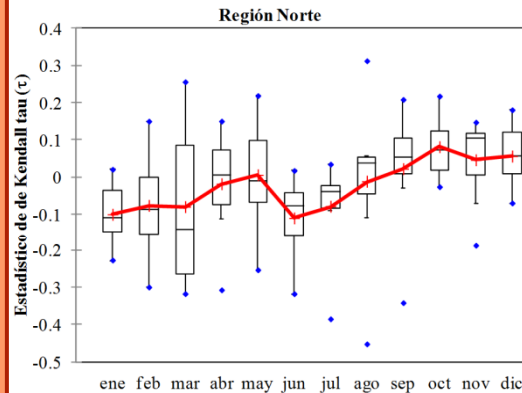
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Series de máximos mensuales (Mann-Kendall)



Mes	Nivel de confianza 99%						Nivel de confianza 95%					
	Norte		Central		Mediterránea		Norte		Central		Mediterránea	
	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.
Ene	0	0	9	0	16	0	2	0	14	1	23	2
Feb	2	0	9	0	20	1	2	0	20	0	30	2
Mar	3	1	15	0	23	0	3	2	24	0	29	2
Abr	1	0	11	0	10	1	1	0	14	0	18	0
May	1	0	7	0	7	2	1	1	12	0	16	2
Jun	1	0	11	0	21	2	2	0	15	1	26	2
Jul	1	1	14	1	19	2	1	0	16	2	23	2
Ago	1	0	15	4	14	2	1	1	17	5	19	3
Sep	1	0	15	3	16	1	1	1	18	5	19	3
Oct	0	0	7	1	14	0	0	2	10	2	21	1
Nov	0	0	5	0	11	0	1	0	7	1	15	1
Dic	0	0	6	1	12	0	0	0	10	1	19	0



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

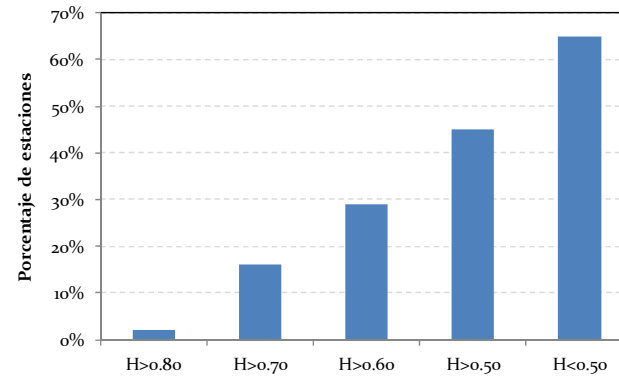
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Exponente de Hurst (H) estimado a través del método de rango escalado



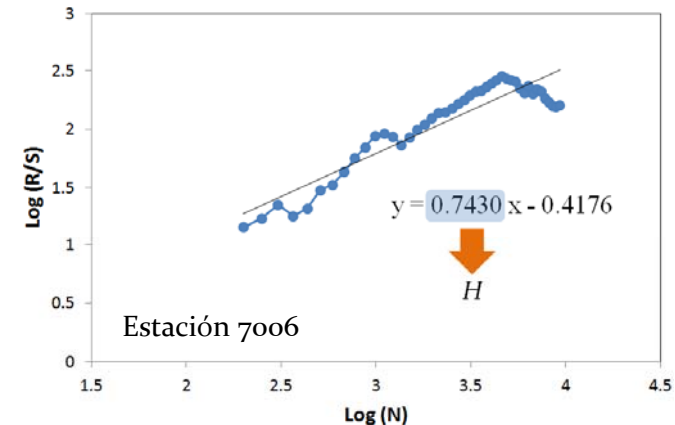
H > 0.50

- ✓ 55% régimen muy alterado
- ✓ 29% régimen poco alterado
- ✓ 16% natural



Remuestreo para evaluar si los valores de H son estadísticamente diferentes de 0.5 (Koutsouyanis, 2003; 2006).

- ✓ Cada serie es remuestreada 200 veces (*bootstrap*)
- ✓ Hipótesis nula H_0 ($H=0.50$)
- ✓ Hipótesis alternativa H_1 ($H \neq 0.50$)



Solo 32% de las series existe evidencia estadística para rechazar H_0 y asumir H_1

Los resultados reflejan más que persistencia natural en las series, el efecto de factores humanos



Influencia de la variabilidad climática y los embalses en los cambios en el régimen de crecidas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

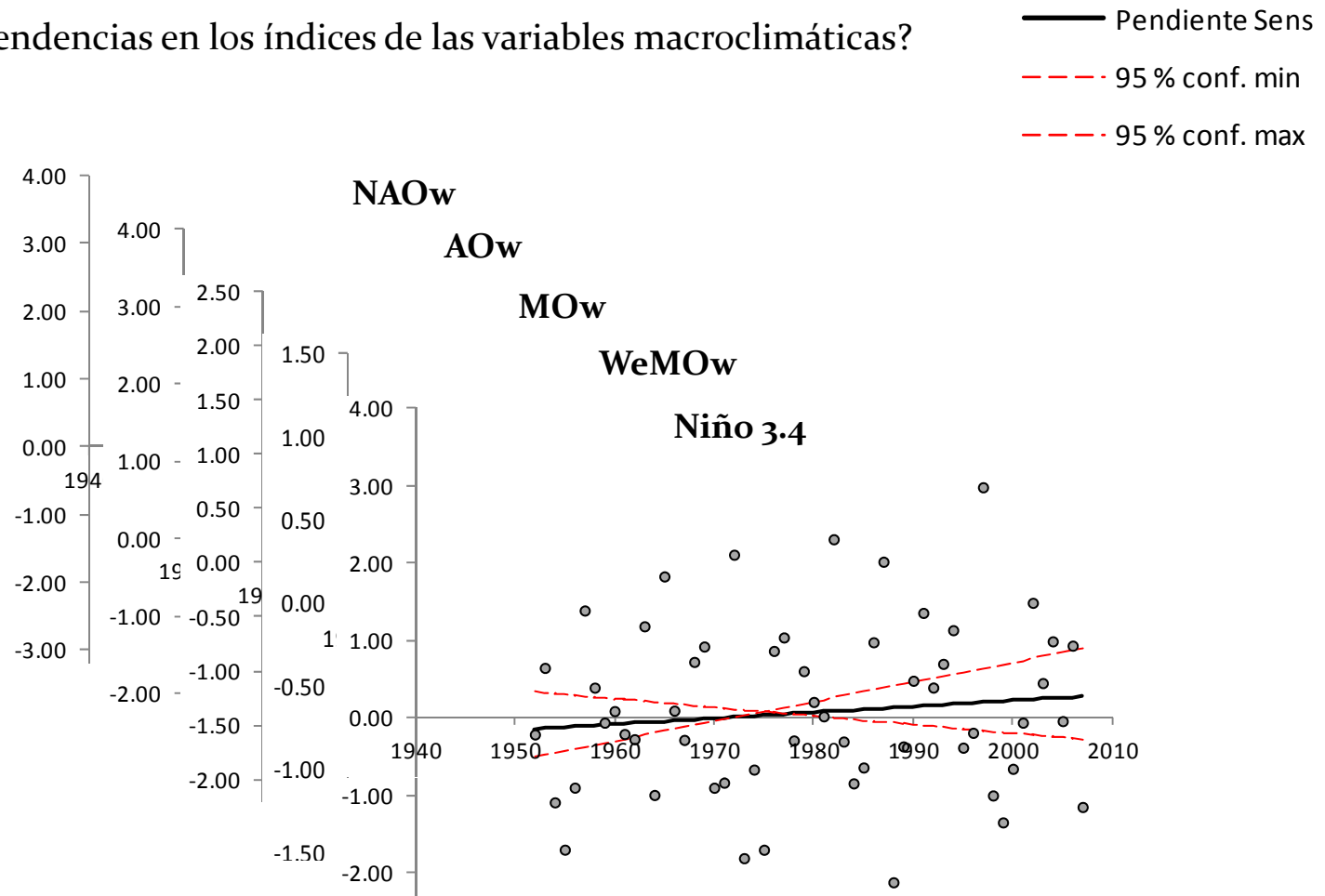
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

¿Tendencias en los índices de las variables macroclimáticas?



La MOC presenta una teleconexión débil con los meses de baja frecuencia (los patrones de baja frecuencia en el Hemisferio Mediterráneo) (López-Buñales, 2008)



Influencia de la variabilidad climática y los embalses en los cambios en el régimen de crecidas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

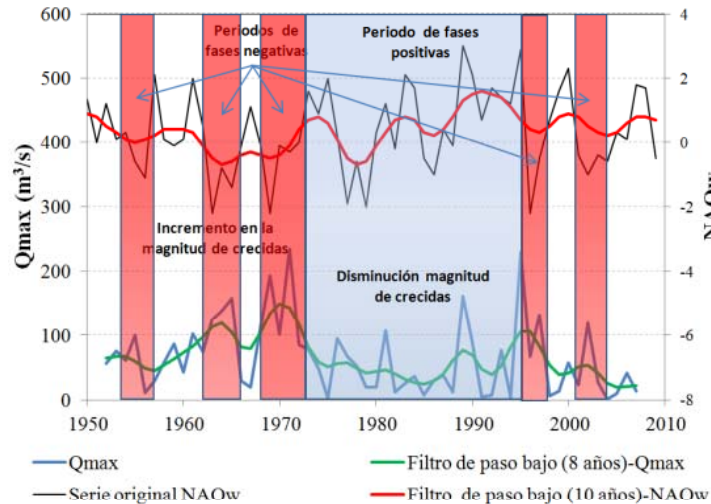
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

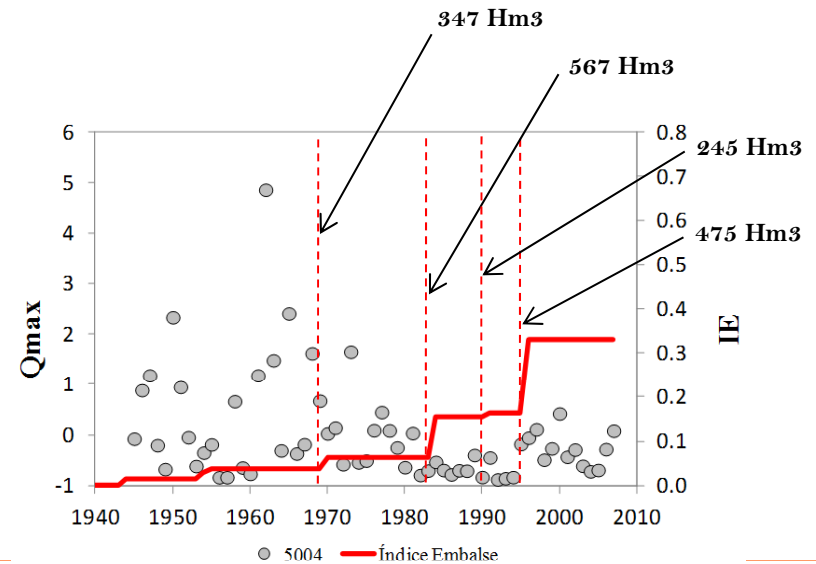
7. Conclusiones



Estación 2046 (régimen natural)

La construcción de embalses ha impactado en el régimen de caudales

Sincronía en la evolución interanual de los regímenes de caudales máximos y las variables macroclimáticas



Estación 5004 (régimen alterado)



Efectos de la no estacionaridad en el análisis de frecuencias de crecidas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

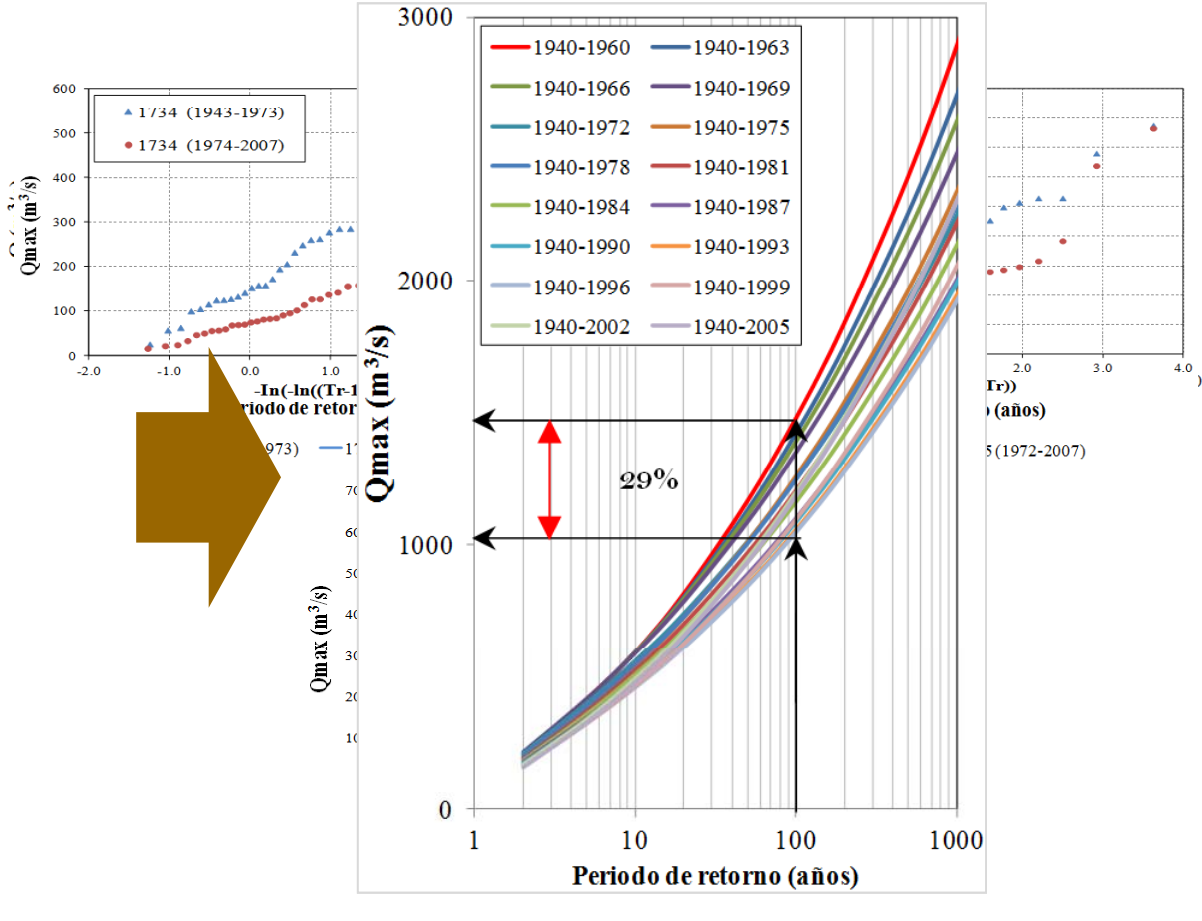
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Distribución empírica de las frecuencias de las crecidas en los cuantiles de los períodos actuales de la estimación de los cuantiles para el período 1973-1999





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Producto de los resultados reportados en diversos estudios, ha surgido una **hipótesis** que apunta en el sentido de un importante **impacto de fenómenos que ocurren en la macroescala en la hidrología ibérica**. (Martín-Vide, J., 2001; Trigo et al., 2004; Rodríguez-Puebla y Nieto, 2010; Moran-Tejeda et al., 2010)

¿Existe una teleconexión consistente entre los índices de las variables macroclimáticas y las series temporales de caudales máximos?

Objetivos

- ✓ Sensibilidad en la respuesta de los caudales máximos a los patrones de baja frecuencia (escala mensual y anual)
- ✓ Interacción entre los meses de mayor actividad de los patrones de baja frecuencia y los caudales máximos
- ✓ Influencia de los episodios extremos de las variables macroclimáticas
- ✓ Estudiar la asociación entre las variables desde un punto de vista más regional

Métodos estadísticos

- ✓ Test de Kendall tau (Hirsch et al., 1992)
- ✓ Análisis FOES (Von Storch et al., 1986; 1995)



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

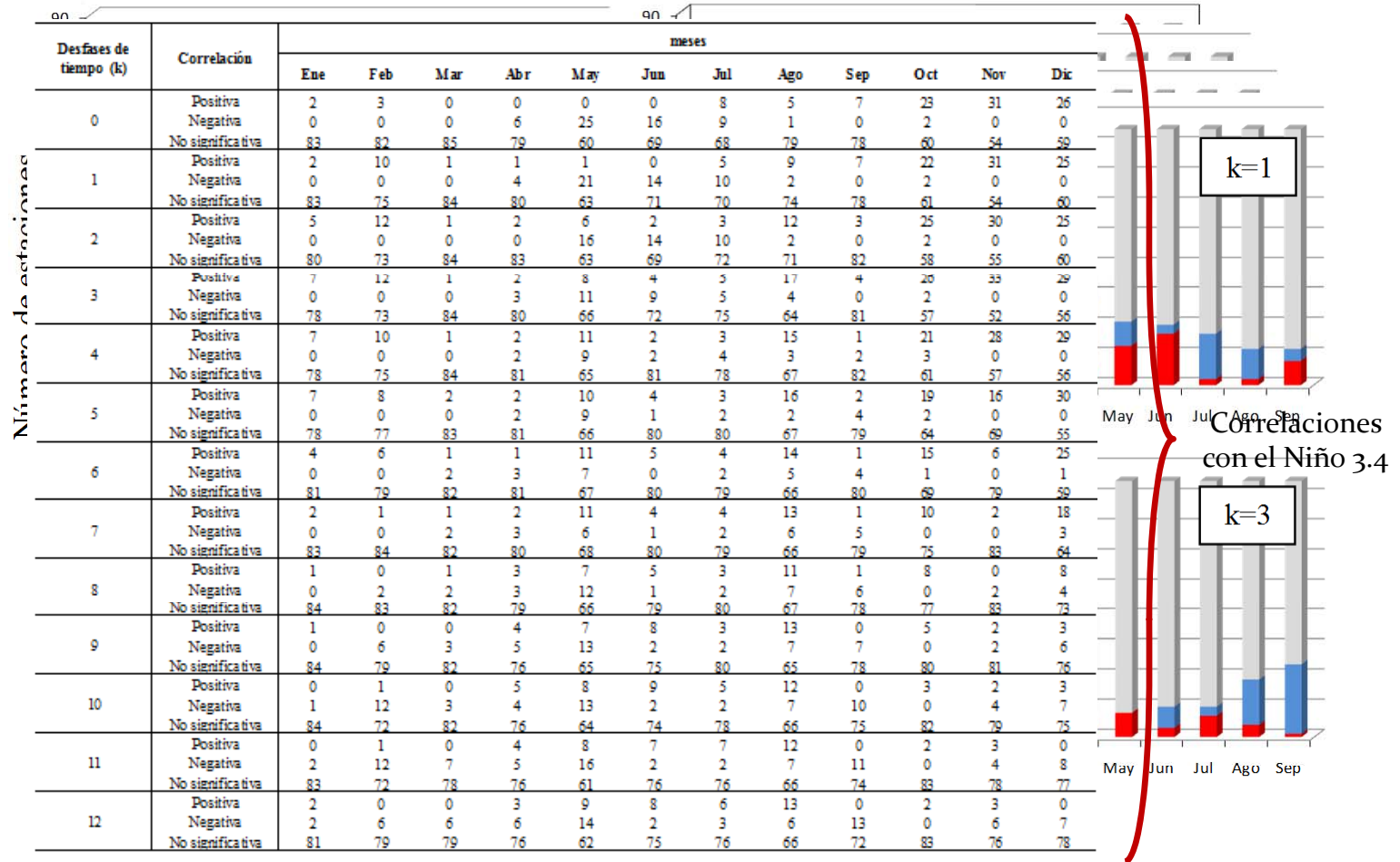
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



➤ k indica el rezago temporal en meses

➤ Nivel de confianza del 95%



Influencia de los patrones de baja frecuencia en las crecidas mensuales

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

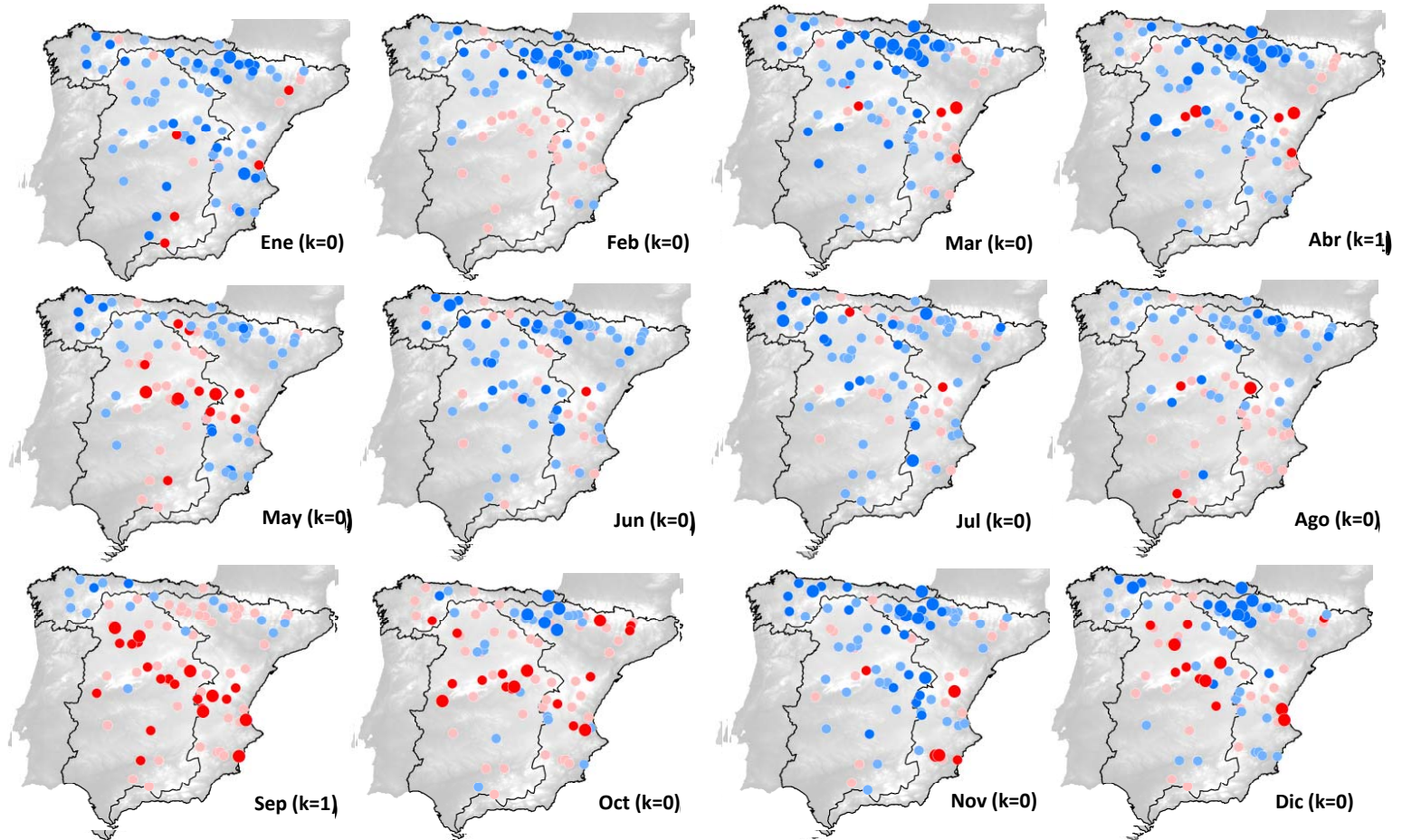
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

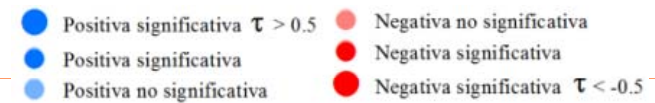
5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



WMOi vs Qmax





Influencia de los patrones de baja frecuencia en las crecidas anuales

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

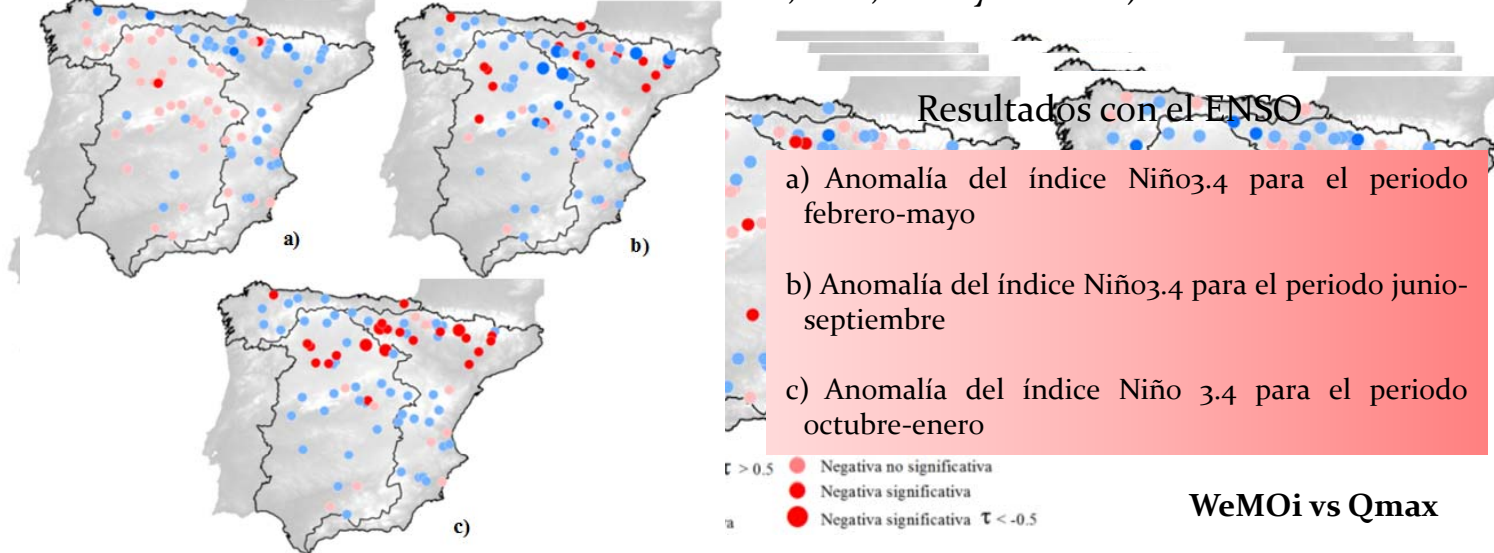
4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

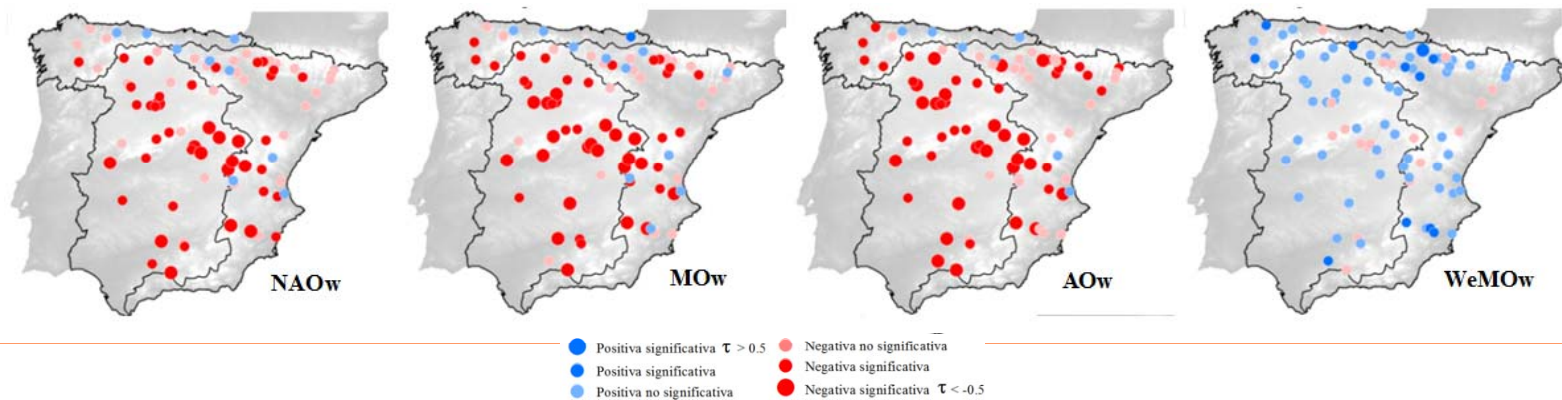
6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

☐ Asumiendo el índice climático mensual (NAOi, AOi, MOi y WeMOi)



☐ Asumiendo el índice climático invernal (NAOw, AOw, MOw y WeMOw)



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Umbral:

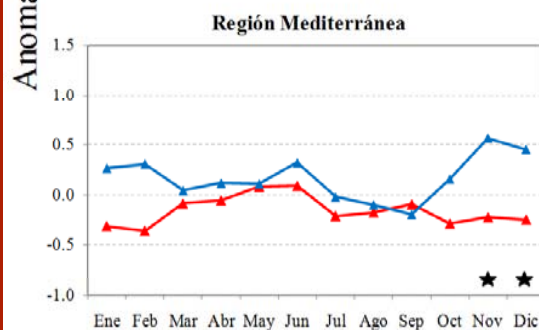
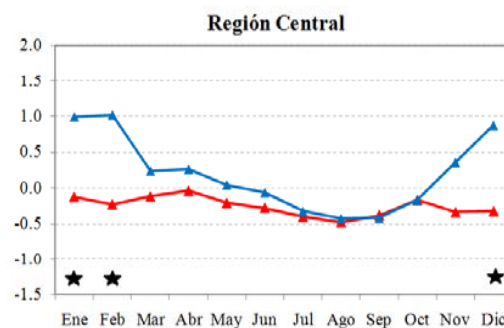
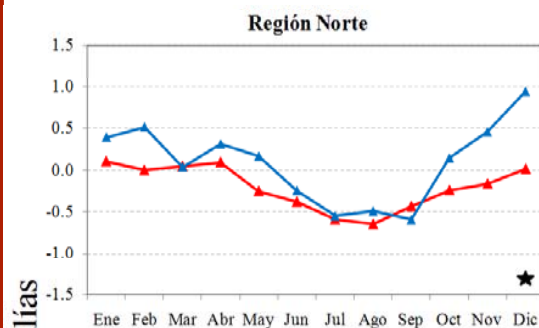
☐ Años extremos positivos:

índice climático $> \mu + \sigma$

☐ Años extremos negativos:

índice climático $< \mu - \sigma$

	Episodios extremos positivos	Episodios extremos negativos
NAO	1956, 1960, 1966, 1972, 1974, 1982, 1988, 1989, 1991, 1992, 1993, 1994, 1999,	1962, 1964, 1968, 1976, 1978, 1995
AO	1972, 1974, 1975, 1988, 1989, 1991, 1992, 1994, 1999	1959, 1962, 1965, 1968, 1969, 1976, 1985, 2000
MO	1956, 1960, 1961, 1974, 1980, 1982, 1988, 1991, 1993, 1994, 1999, 2006, 2007	1954, 1955, 1962, 1968, 1971, 1976, 1977, 1978, 1995, 1996
WeMO	1959, 1960, 1965, 1969, 1982, 1983, 1993, 1994	1963, 1971, 1975, 1989, 1990, 1991, 1992, 1995, 1996, 1997, 2007
ENOS	1959, 1965, 1972, 1982, 1987, 1991, 1997, 2002	1954, 1955, 1964, 1973, 1975, 1988, 1998, 1999, 2007



ENSO

— Fase positiva — Fase negativa

* Diferencia entre las medias de las anomalías positivas y negativas

Test de Wilcoxon- Mann

Whitney



Interacción entre los patrones de baja frecuencia en los meses de invierno y las crecidas mensuales

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

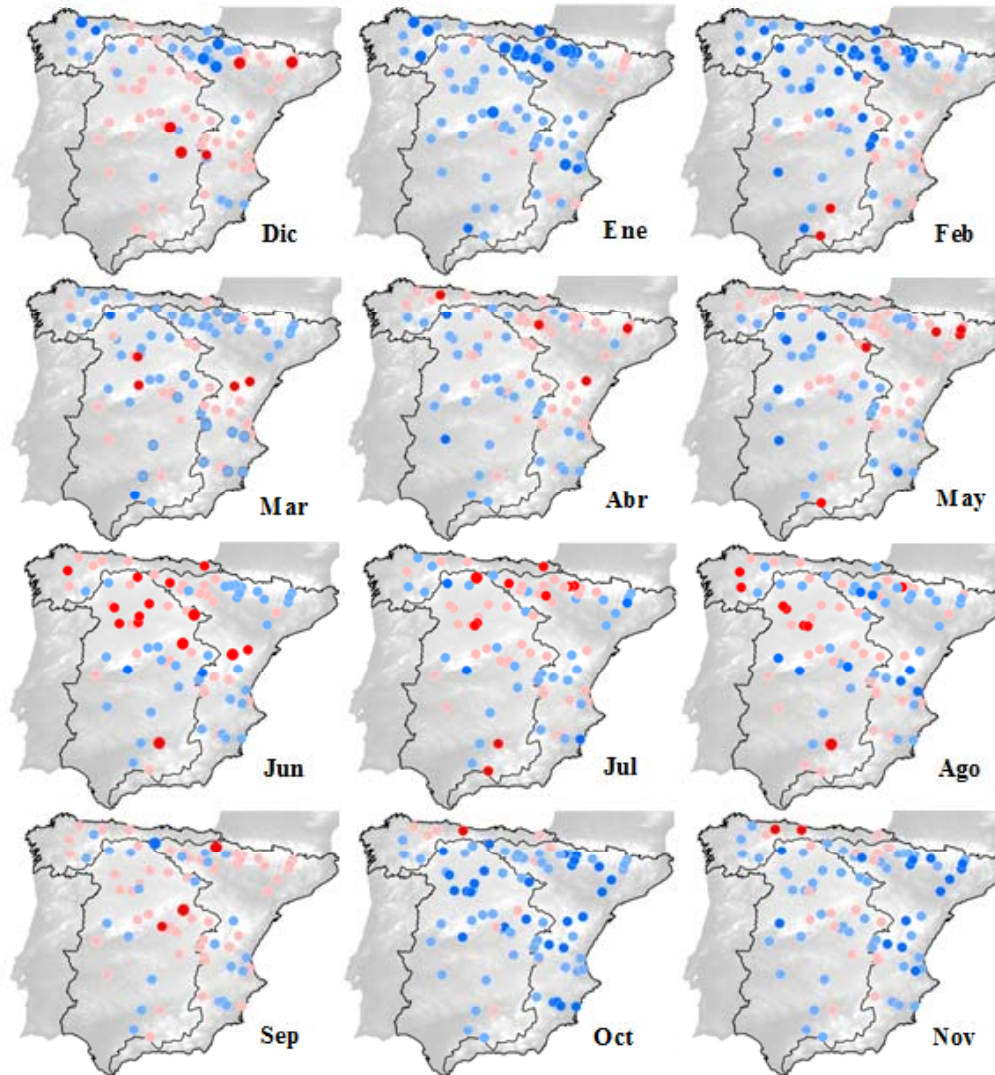
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

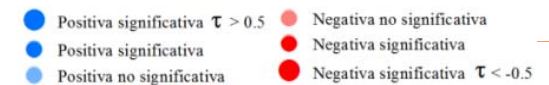
5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



WAMOw vs Qmax





Índice

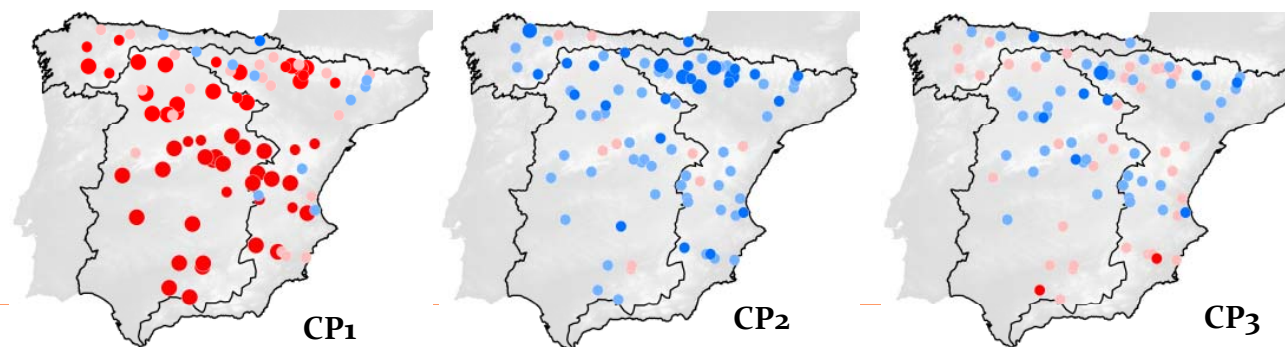
- 1. Introducción
- 2. Caso de estudio
- 3. Análisis de la estacionaridad
- 4. Teleconexión: Análisis de correlación
- 5. Teleconexión: Análisis wavelet
- 6. Modelación no estacionaria
- 7. Conclusiones

Definición de grupos de variables para el análisis FOEs

Grupos de series de caudales máximos

	CP	Crecidas			Crecidas			VM
		1	2	3-N	3-C	3-M		
V.M.	1	26.08	27.28	39.64	40.24	25.31	51.47	
	CP1	9.2592	10.171	19.61	10.60	15.53	26.29	
	CP2	0.271	0.163	0.219	0.266	0.275	0.042	
	CP3	7.29	7.43	11.61	6.96	7.36	17.63	
	4	5.74	6.78	9.16	6.27	6.76	3.32	
	5	4.50	4.59	6.42	4.62	5.64	1.28	
	6	4.12	4.28	5.72	4.18	5.25	CP3	
V.M.	CP1	3.270	-0.810	-0.597	0.063	0.124	-0.441	0.128
	CP2	0.393	0.049	0.197	0.018	0.078	0.372	0.027
	CP3	-0.054	0.209	0.063	0.250	-0.076	0.079	0.221

Correlación entre las CP de las variables macroclimáticas y las series de crecidas anuales



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

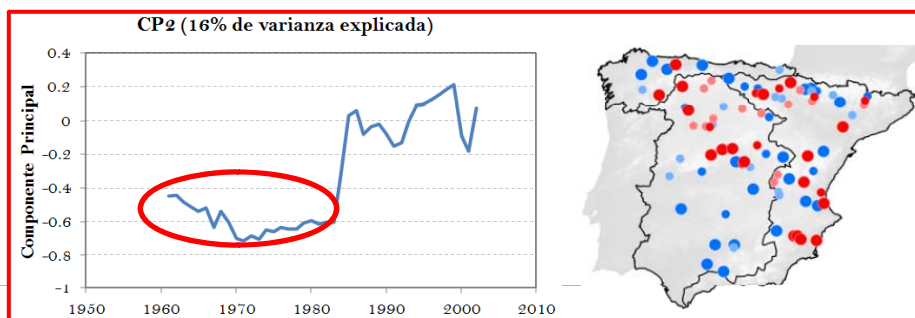
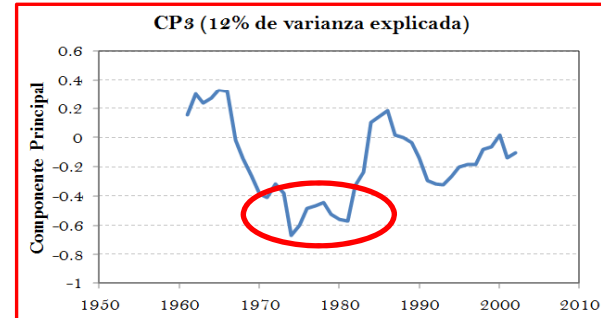
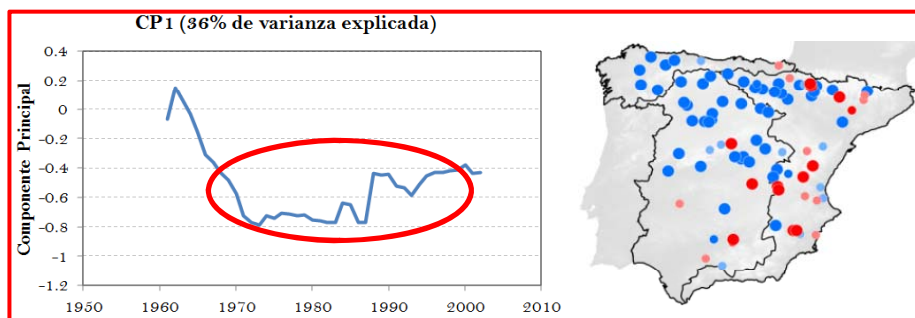
5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- ❑ Test de correlación de Kendall tau
- ❑ Correlaciones considerando la CP1 de las variables macroclimáticas y las series de crecidas anuales
- ❑ Ventana móvil de correlación de 15 años: comenzando el primer calculo 1952-1966 (1959) hasta el periodo 1993-2007

Con base a los diagramas temporales de correlación entre la CP1 y las series temporales de crecidas anuales, se aplicó análisis FOEs a los patrones de correlación para sintetizar el análisis y poder extraer los patrones dominantes de correlación en la evaluación de la influencia de los patrones de baja frecuencia en los regímenes de crecidas



● Positiva significativa $\tau > 0.5$ ● Negativa no significativa
● Positiva significativa ● Negativa significativa
● Positiva no significativa ● Negativa significativa $\tau < -0.5$



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

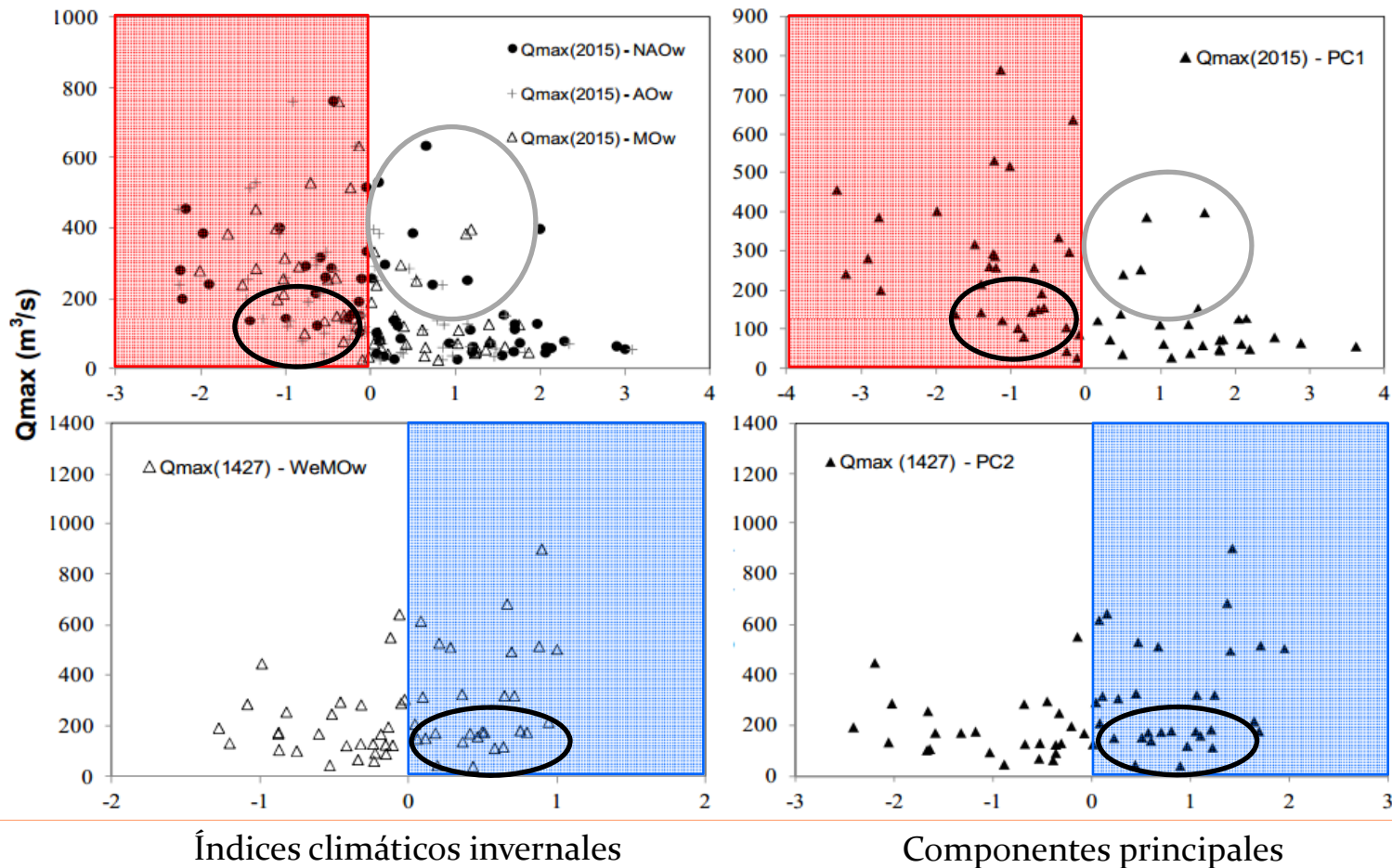
4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- ✓ Presencia de no linealidad en la respuesta a la variabilidad climática
- ✓ Caudales moderados se presentan también en fases positivas





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

El **análisis *wavelet*** nace como una necesidad ante las limitaciones del análisis de Fourier de reproducir **señales no estacionarias** (Morlet et al. 1982)

Teoría de *wavelet*

- ✓ La principal diferencia entre la teoría de Fourier y la teoría *wavelet* radica en que las funciones *wavelet* varían tanto en **frecuencia** como en **tiempo**
- ✓ Las herramientas matemáticas que conforman la teoría de *wavelet* son: las *wavelets*, la transformada *wavelet* discreta y **la transformada *wavelet* continua**

$$\psi_{a,b} = \frac{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}{\sqrt{|a|}}; a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$



Wavelet de Morlet (Torrence and Compo, 1998)

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$$

Transformada *wavelet* continua

Permite descomponer una serie temporal en el **dominio tiempo-frecuencia**, y por tanto, determinar sus **modos dominantes de variabilidad**

Potencia cruzada *wavelet* y coherencia *wavelet*

$$W_{xy}(a, b) = W_x(a, b)W_y^*(a, b) \quad R_{xy}(a, b) = \frac{|S(W_{xy}(a, b))|}{\sqrt{S(|W_{xy}(a, b)|)S(|W_{xy}(a, b)|)}}$$



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

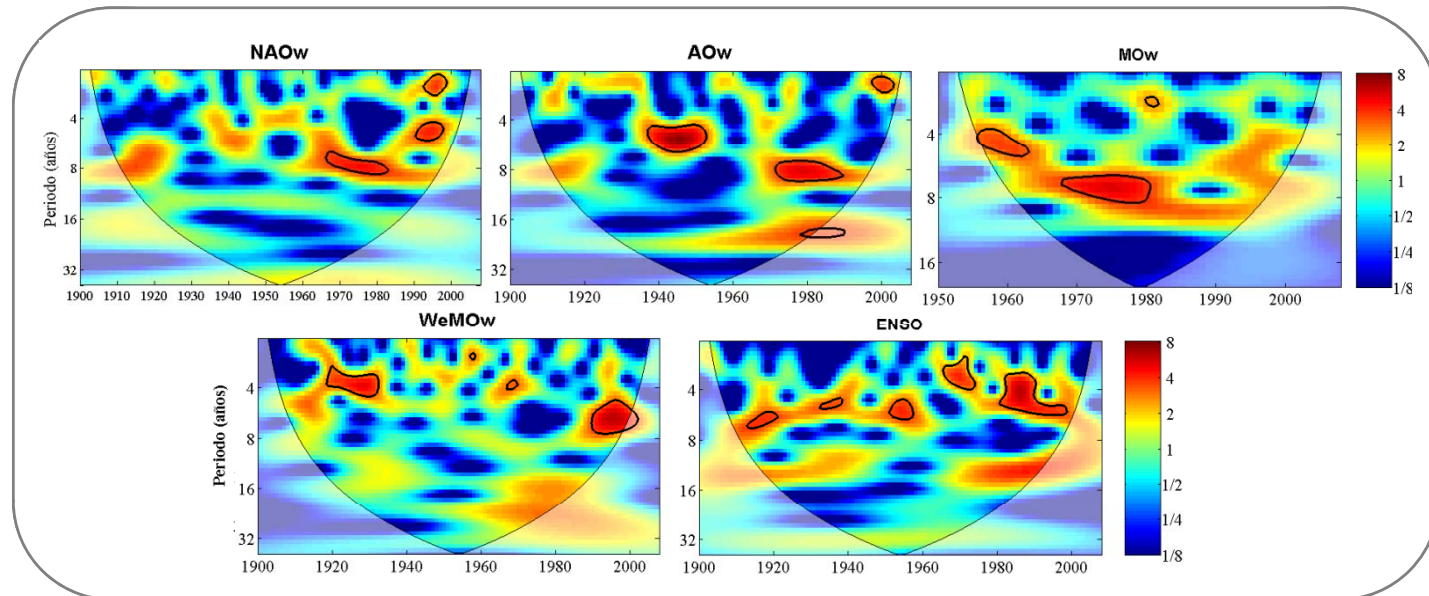
5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Espectros de potencia *wavelet* (WPS)

Variables macroclimáticas



- ✓ La actividad energética es intermitente
- ✓ La actividad energética se tiende a concentrar en periodos interanuales (2-8 años)
- ✓ Componentes de alta energía se distinguen también en frecuencias mas bajas, pero de menor amplitud y persistencia

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

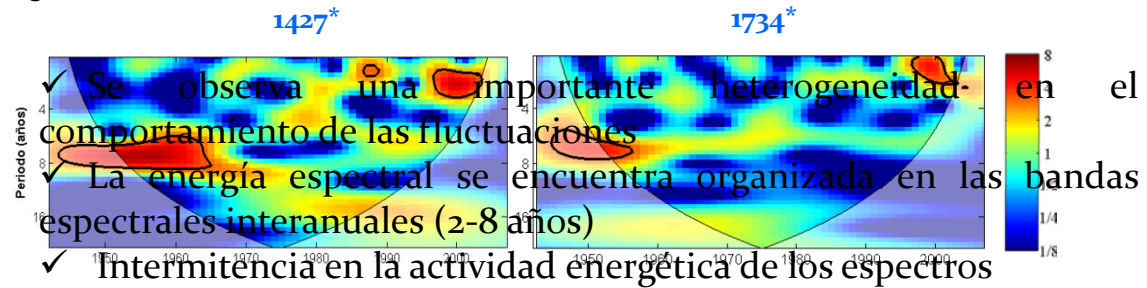
5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Series temporales de caudales máximas anuales

Región Norte:



*régimen natural

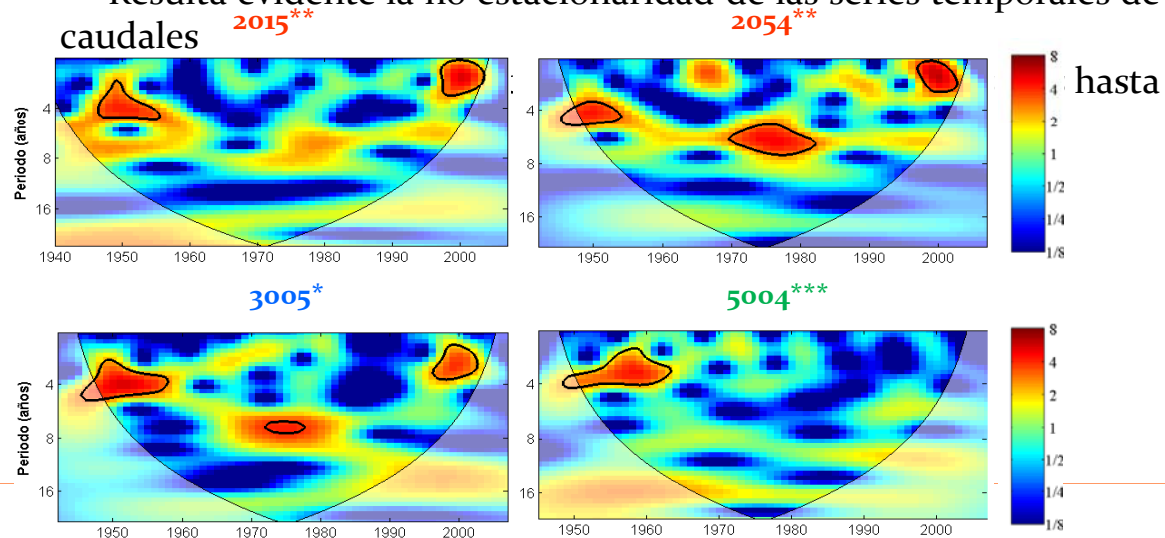
** régimen poco alterado

***régimen muy alterado

3 importante fluctuaciones intensas y persistentes

Región Central:

Resulta evidente la no estacionariedad de las series temporales de caudales





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

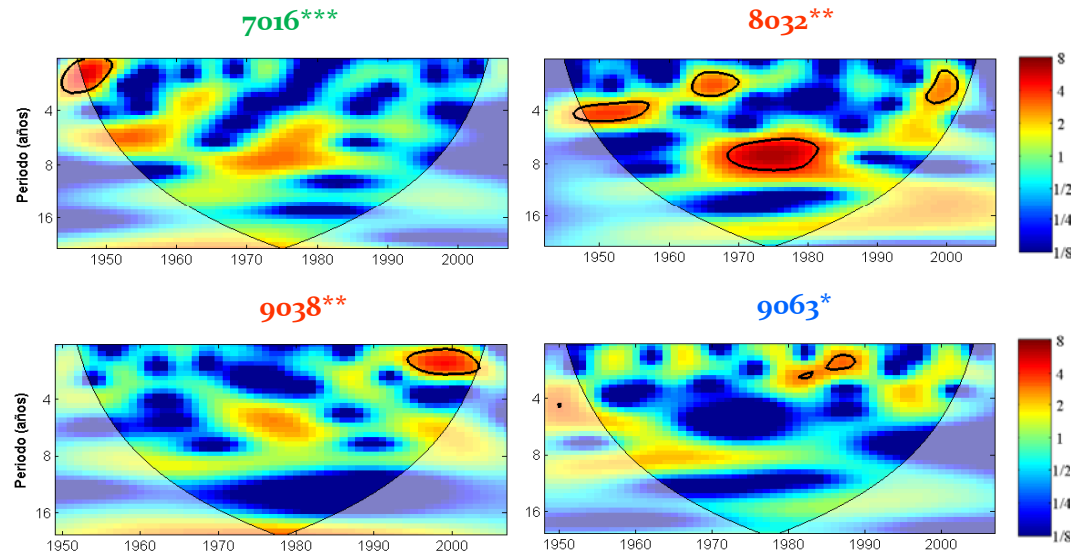
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Región Mediterránea:



*régimen natural

** régimen poco alterado

***régimen muy alterado

- ✓ El análisis de los espectros remarca la alta heterogeneidad en los regímenes de crecidas en la región Mediterránea
- ✓ Son evidentes los cambios en la energía wavelet lo cual exhibe los cambios en la varianza de las series temporales de caudales máximos
- ✓ Se denotan los síntomas de no estacionaridad presentes en las series temporales

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

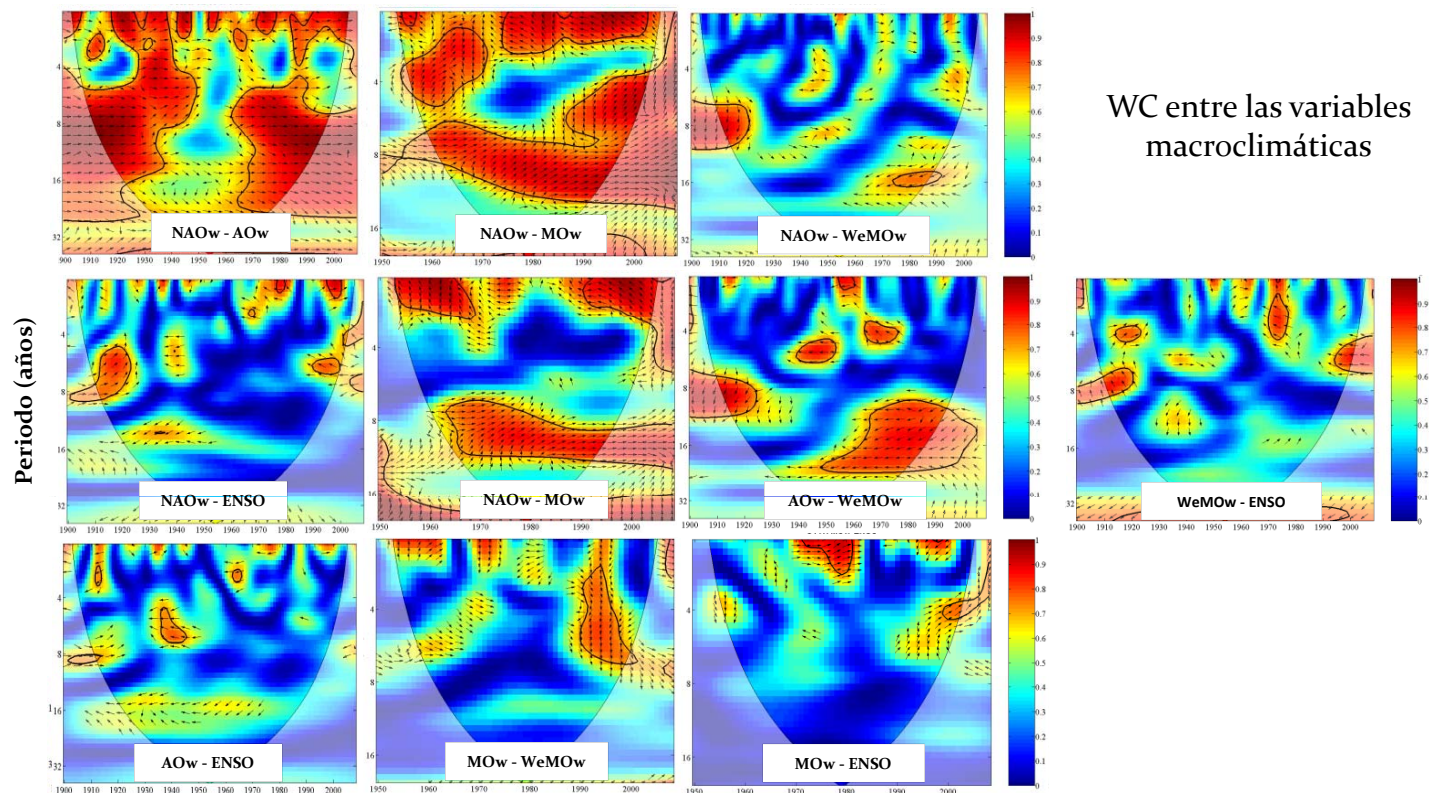
5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Espectros de potencia cruzada *wavelet* (CWS) y coherencia *wavelet* (WC)

Variables macroclimáticas



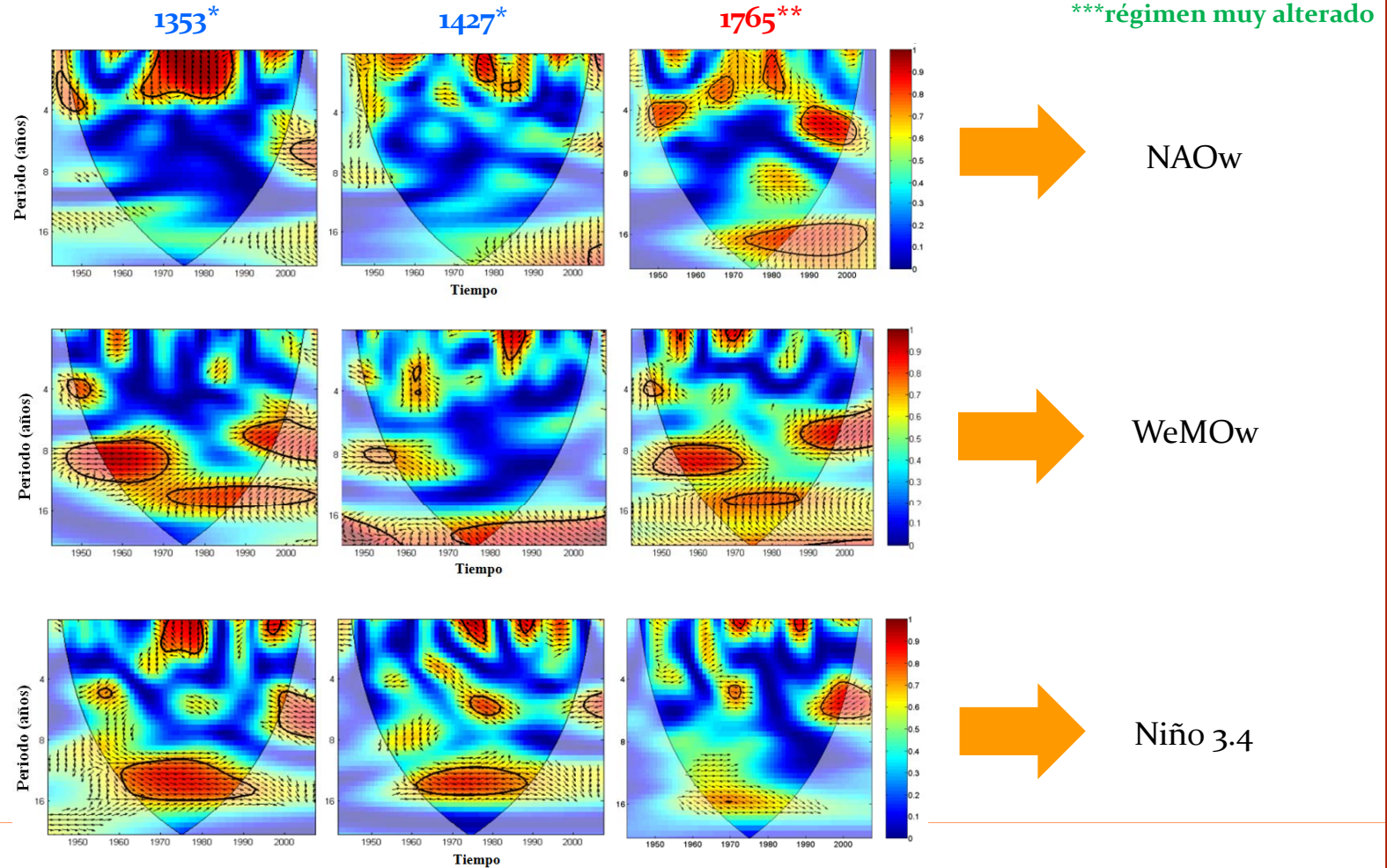


Potencia cruzada wavelet y coherencia entre las series de crecidas anuales y las variables macroclimáticas

Índice

- 1. Introducción
- 2. Caso de estudio
- 3. Análisis de la estacionaridad
- 4. Teleconexión: Análisis de correlación
- 5. Teleconexión: Análisis wavelet**
- 6. Modelación no estacionaria
- 7. Conclusiones

Región Norte:





Potencia cruzada wavelet y coherencia entre las series de crecidas anuales y las variables macroclimáticas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

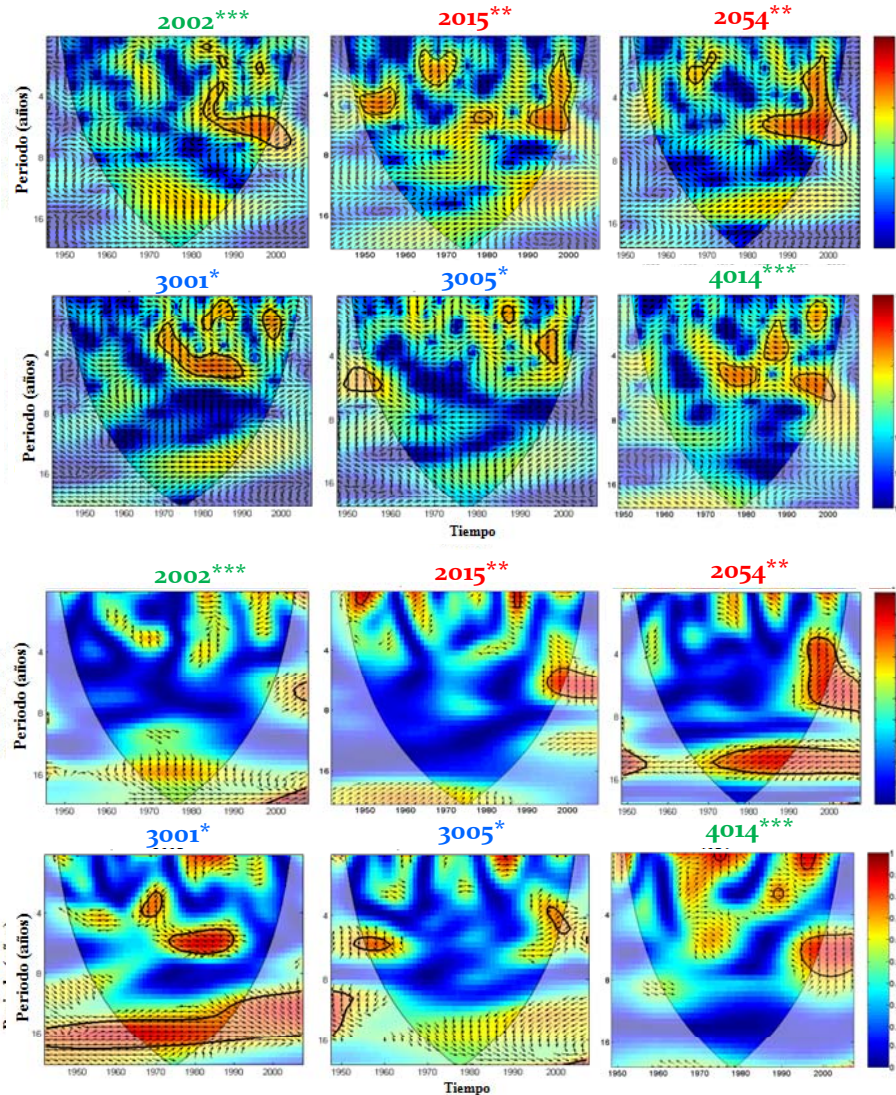
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



*régimen natural

** régimen poco alterado

***régimen muy alterado

Región Central:

~~Niño 3.4~~



Potencia cruzada wavelet y coherencia entre las series de crecidas anuales y las variables macroclimáticas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

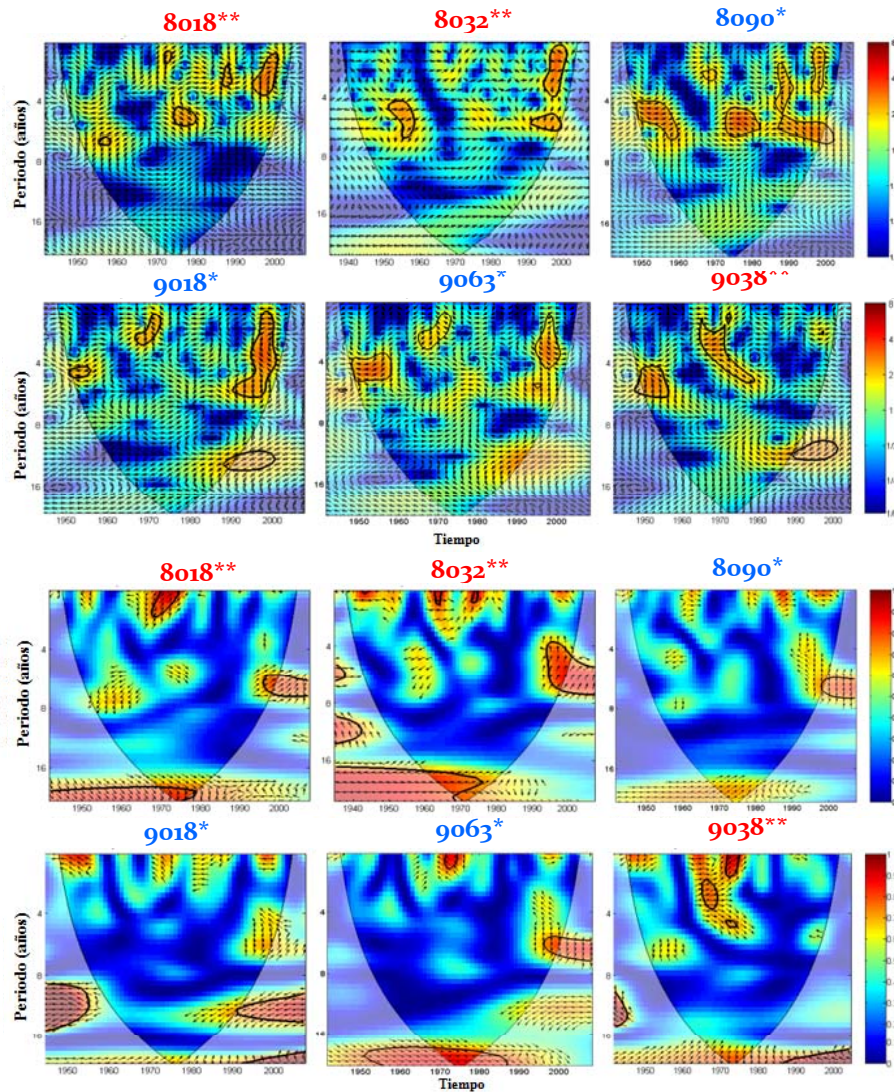
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



*régimen natural

** régimen poco alterado

***régimen muy alterado

Región Mediterránea:

~~WAO~~

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

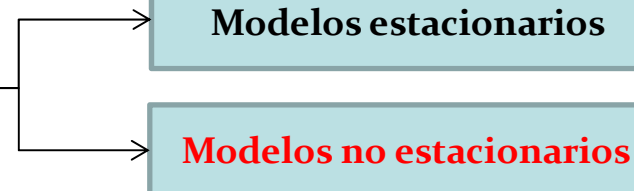
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Análisis de frecuencia de crecidas



- ✓ Modelos con distribuciones de probabilidad con componentes mixtas
(Waylen y Caviedes, 1986; Poveda y Alvarez, 2012)
- ✓ **Modelos de tendencias temporales en los parámetros de las distribuciones**
(McNeil y Saladin, 2000; Stedinger y Crainiceanu 2001; Cox et al., 2002; Yi et al., 2006; Aissaoui-Fqayeh et al., 2009)
- ✓ Modelos de tendencias temporales en los momentos estadísticos de las distribuciones
(Strupcewski et al., 2001a; Strupcewski et al., 2001b)
- ✓ Modelos no estacionarios en un contexto regional
(Cunderlink y Burn 2003; Cunderlink y Ouarda 2006; Leclerc y Ouarda 2007)
- ✓ Método del cuantil de regresión
(Koenkar y Basset, 1978; Sankarasubramanian y Lall ,2003)
- ✓ Método de verosimilitud local
(Davison y Ramesh, 2000; Sankarasubramanian y Lall ,2003)
- ✓ Modelos estocásticos
(Stedinger y Crainiceanu, 2001; Sveinnson et al., 2005)
- ✓ Modelos no estacionarios en un marco Bayesiano
(Kwon et al., 2008; Lima y Lall, 2010; Ouarda y El-Aldouni, 2011)
- ✓ Modelos con la combinación de modelación determinística y la incorporación de datos climáticos simulados (Moglen 2003; Raff et al., 2009; Kwon et al., 2010; Gilroy y McCuen, 2012)

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

¿Podemos garantizar el supuesto de estacionariedad en el comportamiento de los procesos hidrológicos en las escalas interanuales e interdecadales?



Modelos estadísticos no estacionarios capaces de reproducir la variación temporal de los θ_n de la FDP

- ✓ Modelos Lineales (LM)
- ✓ Modelos Lineales Generalizados (GLM)
(Nelder y Wedderburn, 1972)
- ✓ Modelos Aditivos Generalizados (GAM)
(Hastie y Tibshirani, 1990)



Modelos Aditivos Generalizados en Localización, Escala y Forma (GAMLSS)
Risgby y Stasinopoulos (2007)

Los modelos GAMLSS se pueden definir como modelos semi-paramétricos

- ✓ Requiere una FDP para la variable de respuesta
- ✓ Los parámetros de las FDP como función de las covariables puede implicar el uso de formulaciones matemáticas no paramétricas



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Un marco para análisis de frecuencias de crecidas en condiciones no estacionarias en ríos de la España Peninsular se desarrolla sobre la base de los GAMLSS

$$y_i \quad \text{para} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \longrightarrow \quad F_Y(y_i | \theta_i), \quad \longrightarrow \quad \theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ip})$$

Donde cada uno de los parámetros de la FDP pueden encontrarse relacionados con covariables explicativas $\longrightarrow t_p, AO_p, MO_p, NAO_p, WeMO_i$ y IE_i

Rigby y Stasinopoulo (2007) definieron una función de enlace monotónica $g_k(\cdot)$ para relacionar los parámetros de la distribución con el conjunto de covariables seleccionadas .

En nuestro caso las funciones de enlace utilizadas : logarítmica, identidad e inversa

Modelo aditivo semi-paramétrico $\longrightarrow g_k(\theta_k) = X_k \beta_k + \sum_{j=1}^{m_k} h_{jk}(x_{jk})$

Las formulaciones matemáticas no paramétricas utilizadas son los Splines Cúbicos

“Permiten abordar las no linealidades en la relación entre las covariables y los parámetros de las FDP”



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Distribución	Funciones de densidad de probabilidad	Momentos de las distribuciones
Gumbel	$f_y(y \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{\theta_2} \exp\left\{\left(\frac{y-\theta_1}{\theta_2}\right) - \exp\left(\frac{y-\theta_1}{\theta_2}\right)\right\}$ $-\infty < y < \infty, -\infty < \theta_1 < \infty, \theta_2 > 0$	$E[y] = \theta_1 + \gamma\theta_2 \cong \theta_1 + 0.5772\theta_2$ $Var[y] = \pi^2\theta_2^2/6 \cong 1.64493\theta_2^2$
Lognormal	$f_y(y \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\theta_2}} \frac{1}{y} \exp\left\{-\frac{[\log(y) - \theta_1]^2}{2\theta_2^2}\right\}$ $y > 0, \theta_1 > 0, \theta_2 > 0$	$E[y] = \omega^{1/2} e^{\theta_1}$ $Var[y] = \omega(\omega - 1)e^{2\theta_1}, \text{ donde } \omega = \exp(\theta_2^2)$
Weibull	$f_y(y \theta_1, \theta_2) = \frac{\theta_2 y^{\theta_2-1}}{\theta_1^{\theta_2}} \exp\left\{-\left(\frac{y}{\theta_1}\right)^{\theta_2}\right\}$ $y > 0, \theta_1 > 0, \theta_2 > 0$	$E[y] = \theta_1 \Gamma\left(\frac{1}{\theta_2} + 1\right)$ $Var[y] = \theta_1^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{\theta_2} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{1}{\theta_2} + 1\right) \right]^2 \right\}$
Gamma	$f_y(y \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{(\theta_2^2 \theta_1)^{1/\theta_2}} \frac{y^{\frac{1}{\theta_2}-1} \exp\left[\frac{-y}{\theta_2^2 \theta_1}\right]}{\Gamma(1/\theta_2)}$ $y > 0, \theta_1 > 0, \theta_2 > 0$	$E[y] = \theta_1$ $Var[y] = \theta_2^2 \theta_1^2$
Generalized Gamma	$f_y(y \theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{ \theta_1 y^{\theta_1 \theta_3 - 1}}{\Gamma(\theta_3) \theta_2^{\theta_1 \theta_3}} \exp\left\{-\left(\frac{y}{\theta_2}\right)^{\theta_1}\right\}$ $y > 0, -\infty < \theta_1 < \infty, \theta_2 > 0, \theta_3 > 0$	$E[y] = \theta_1 \Gamma\left(\Omega + \frac{1}{\theta_2}\right) / \left[\Omega^{1/\theta_3} \Gamma(\Omega)\right]$ $Var[y] = \theta_1^2 \left\{ \Gamma(\Omega) \Gamma\left(\Omega + \frac{2}{\theta_3}\right) - \left[\Gamma\left(\Omega + \frac{1}{\theta_3}\right) \right]^2 \right\}$ $/ \left\{ \Omega^{2/\theta_3} [\Gamma(\Omega)]^2 \right\}$ $\Omega = 1/(\theta_2^2 \theta_3)$

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

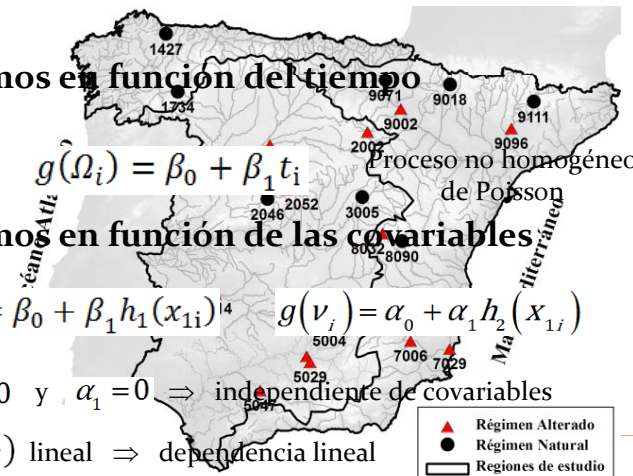
7. Conclusiones

Caudales máximos anuales

- ❑ **Modelo 0.** $Y_t \sim F(y_i; \theta)$
Modelo estacionario
- ❑ **Modelo 1.** $Y_t \sim F(y_i; \theta_t(t))$
Modelo de tendencia
- ❑ **Modelo 2.** $Y_t \sim F(y_i; \theta_t(\text{NAO}_{wt}, \text{AO}_{wt}, \text{WeMO}_{wt}, \text{MO}_{wt}, \text{IE}_t))$
Modelo de covariables invernales
- ❑ **Modelo 3.** $Y_t \sim F(y_i; \theta_t(\text{CP1}_t, \text{CP2}_t, \text{IE}_t))$
Modelo de componentes principales
- ❑ **Modelo 4.** $Y_t \sim F(y_i; \theta_t(\text{NAO}_{it-1}, \text{AO}_{it-1}, \text{WeMO}_{it-1}, \text{MO}_{it-1}, \text{IE}_t))$
Modelo de covariables con rezago en la dependencia

Caudales máximos por encima de un umbral

- ❑ **Modelación del número de eventos máximos en función del tiempo**
Casos de estudio
 $P(N_i | \Omega_i) = \frac{e^{-\Omega_i} \Omega_i^N}{N!} \quad \forall (N = 0, 1, 2, \dots) \quad \Omega_i > 0 \quad g(\Omega_i) = \beta_0 + \beta_1 t_i$
Proceso no homogéneo de Poisson
- ❑ **Modelación del número de eventos máximos en función de las covariables**
Régimen natural
Régimen alterado
✓ Periodo de modelación 1950 - 2007
 $g(\Omega_i) = \beta_0 + \beta_1 h_1(x_{1i})^4 \quad g(v_i) = \alpha_0 + \alpha_1 h_2(x_{1i})$
Si $\beta_1 = 0$ y $\alpha_1 = 0 \Rightarrow$ independiente de covariables
Si $h_n(\cdot)$ lineal \Rightarrow dependencia lineal



$$P(N_i | \Omega_i, v_i) = \frac{\Gamma(N + \frac{1}{v_i})}{\Gamma(N+1) \Gamma(\frac{1}{v_i})} \left(\frac{\Omega_i v_i}{\Omega_i v_i + 1} \right)^{N+1/v_i}$$

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Selección de los modelos:

- Criterio de Información de Akaike (CIA)
- Criterio Bayesiano de Schwarz (CBS)

Para la selección de los grados de libertad en las formulaciones no paramétricas (splines cúbicos)  $\lambda < \ln(n)$

La bondad del ajuste de los modelos se evalúa verificando la normalidad e independencia de los residuales

- Función de autocorrelación
- Cálculo de los primeros cuatro momentos estadísticos y el coeficiente de correlación de Filliben
- Gráficos de cuantiles qq-plot
- Gráficos de cuantiles sin tendencia worm-plot



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Modelo 1 (modelo de tendencia)

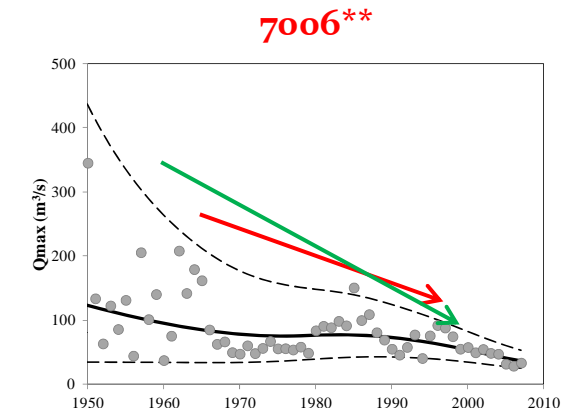
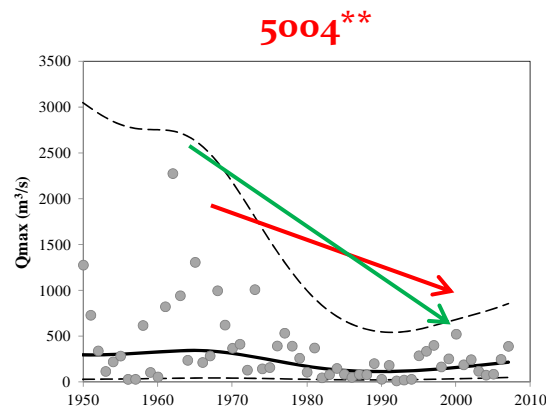
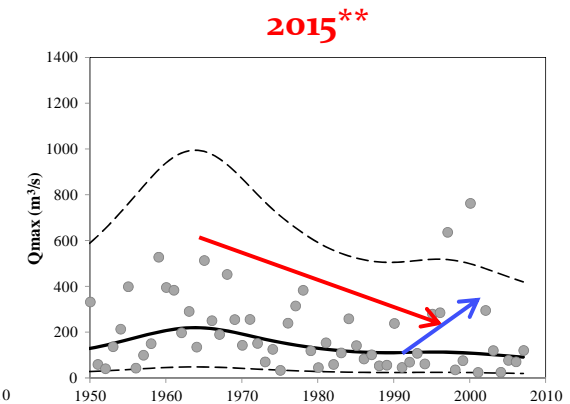
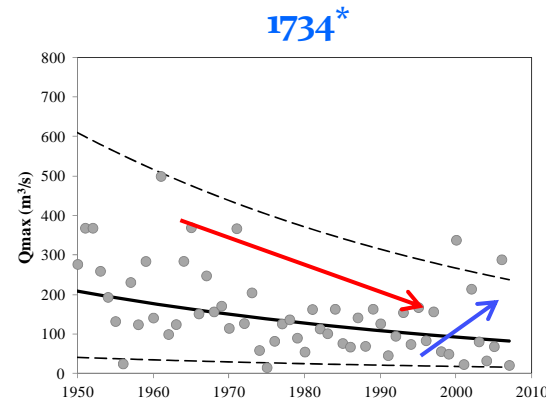
✓ Los modelos muestran el potencial para describir adecuadamente las no estacionariedades

✓ Los modelos exhiben no linealidades en la relación entre el tiempo y los parámetros de las FDP

✓ En general, los caudales máximos anuales muestran una disminución notable en la magnitud

✓ La magnitud de la disminución es más evidente en las estaciones 5004 y 7006 (régimen muy alterado)

✓ Un aumento en la magnitud en el periodo 1995-2005 es ignorado en este modelo



● Observaciones — Modelo 1 (Mediana) - - 2.5% - - 97.5%

* régimen natural
** régimen alterado



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Modelo 2 (modelo de covariables invernales)

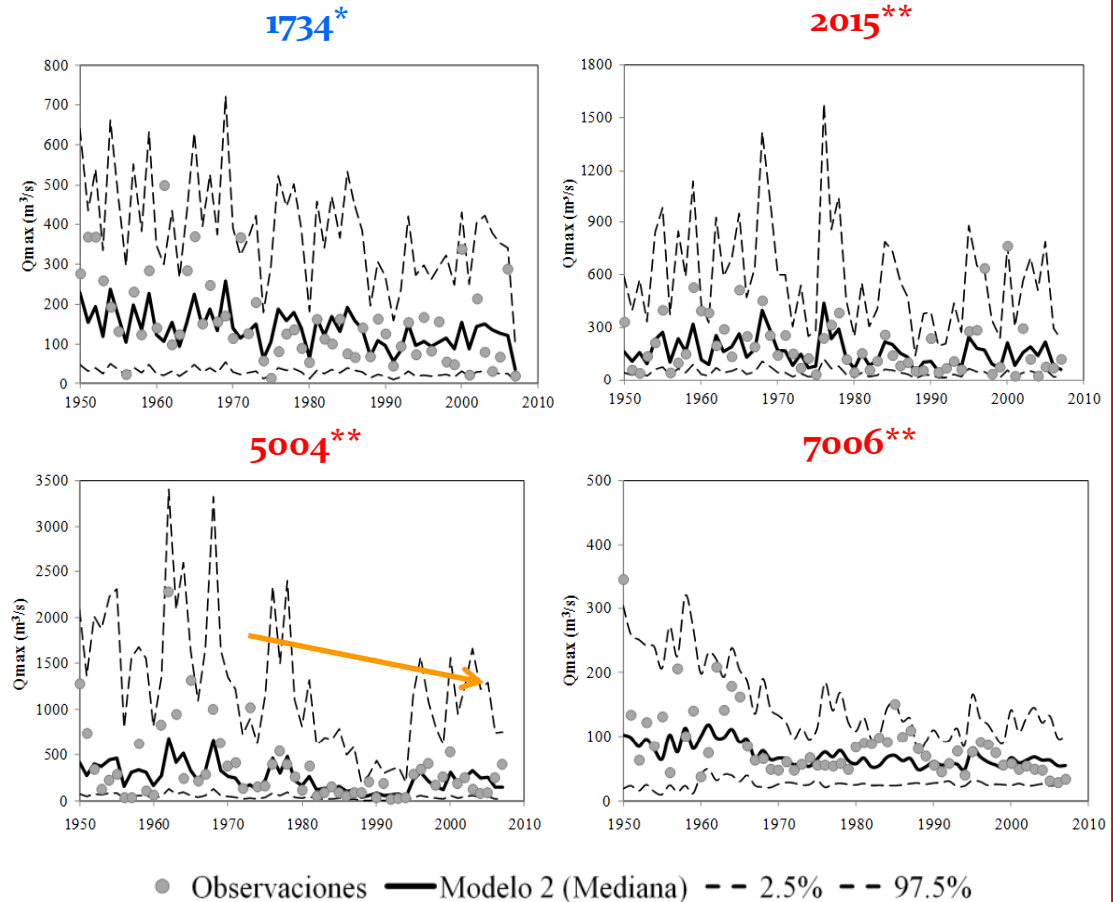
✓ Los modelos estacionarios incorporando las covariables externas muestran una descripción más adecuada

✓ LNO y GA se presentaron como las distribuciones paramétricas más adecuadas

✓ Es de destacar el mayor potencial de la NAO y AO como covariables (12 y 15 estaciones)

✓ EL “IE” mejoró la representación en sitios bajo régimen alterado (covariable significativa en 6 sitios)

✓ Pobre representación de la evolución interanual de las crecidas en estaciones localizadas en la región Mediterránea



* régimen natural
** régimen alterado



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

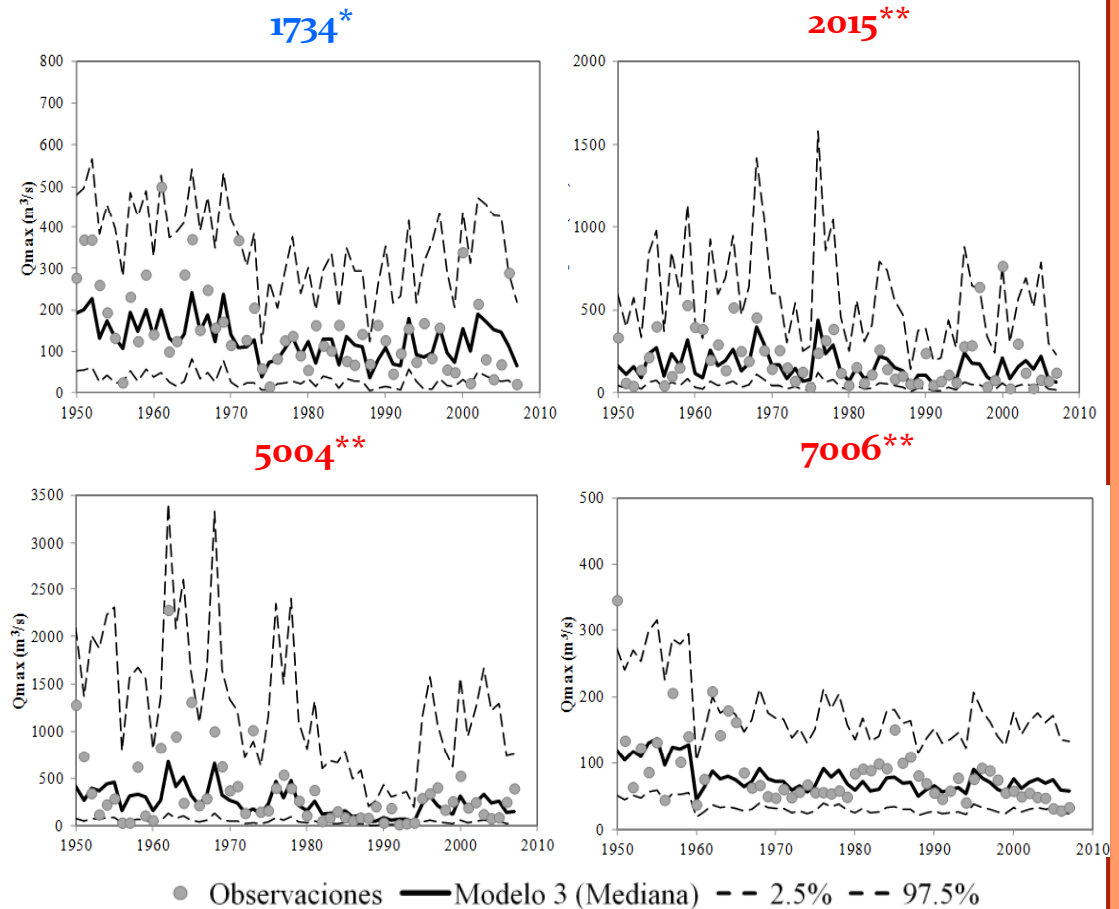
Modelo 3 (modelo de componentes principales)

✓ Los modelos presentan una representación adecuada de la variación interanual

✓ Los modelos resultan más parsimoniosos incorporando las CP como covariables

✓ Se pudo establecer una dependencia lineal en la relación entre las CP y los parámetros de las FDP

✓ La CP₁ resulto covariables significativa en 18 sitios (explica el 66% de la varianza de los índices de las VM)



* régimen natural
** régimen alterado



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

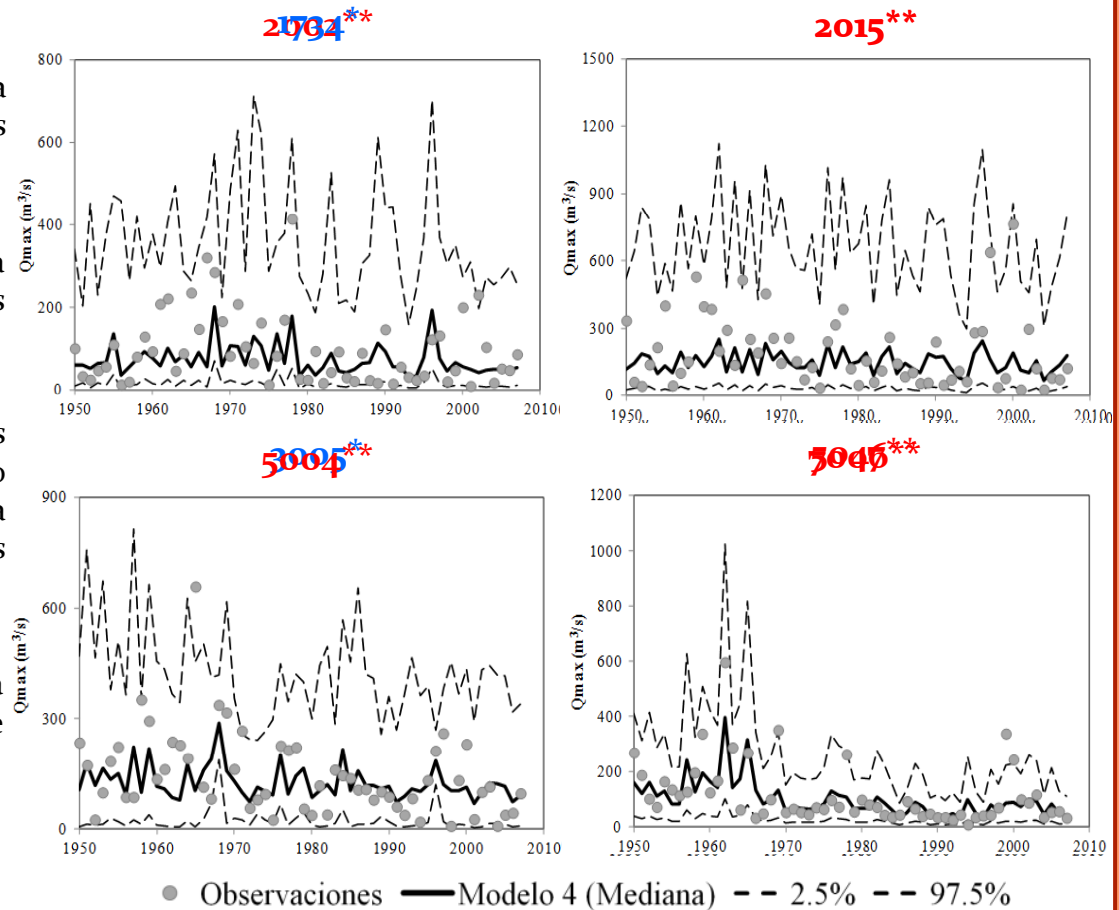
Modelo 4 (modelo de covariables con rezago en la dependencia)

✓ Pobre representación de la evolución interanual de los caudales máximos anuales

✓ Mejores resultados en la modelación utilizando los modelos 2 y 3

✓ Implementación de los índices invernales como covariables (se maximiza la teleconexión entre las VM y los caudales máximos anuales)

✓ Se presenta solo una adecuada descripción en las estaciones de aforo de la región Central



* régimen natural
** régimen alterado



Comparación entre los modelos estacionarios y no estacionarios

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

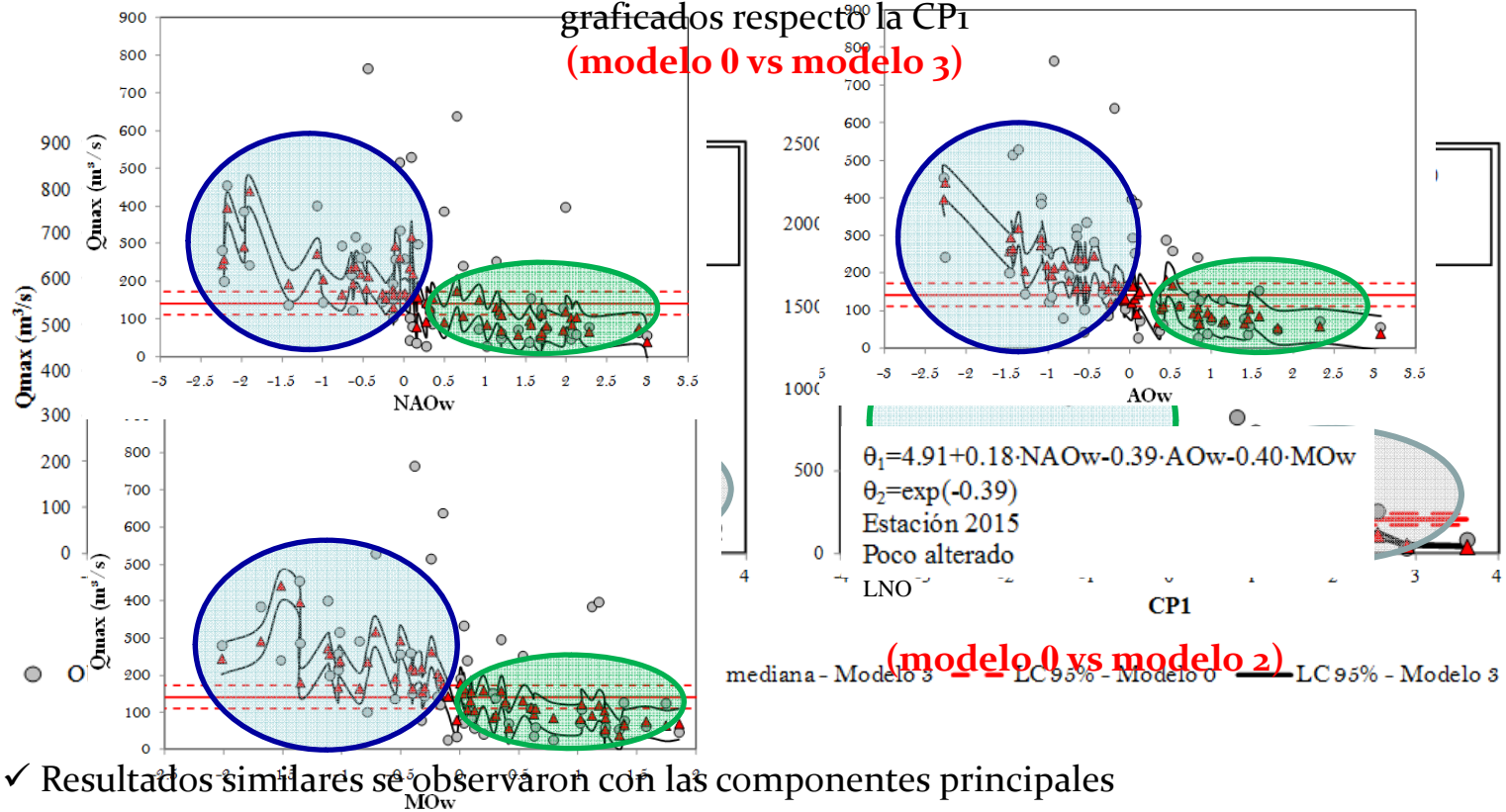
4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Estimaciones de la mediana y los intervalos de confianza del 95% condicionados a la mediana
Estimaciones de la mediana y los intervalos de confianza del 95% condicionados a la mediana



✓ Resultados similares se observaron con las componentes principales

○ Observaciones — Qmax mediana - Modelo 0 ▲ Qmax mediana - Modelo 2 - - LC 95% - Modelo 0 — LC 95% - Modelo 2

✓ El modelo estacionario subestima para valores altos negativos de los índices climáticos

✓ Sobrestima para valores altos positivos



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

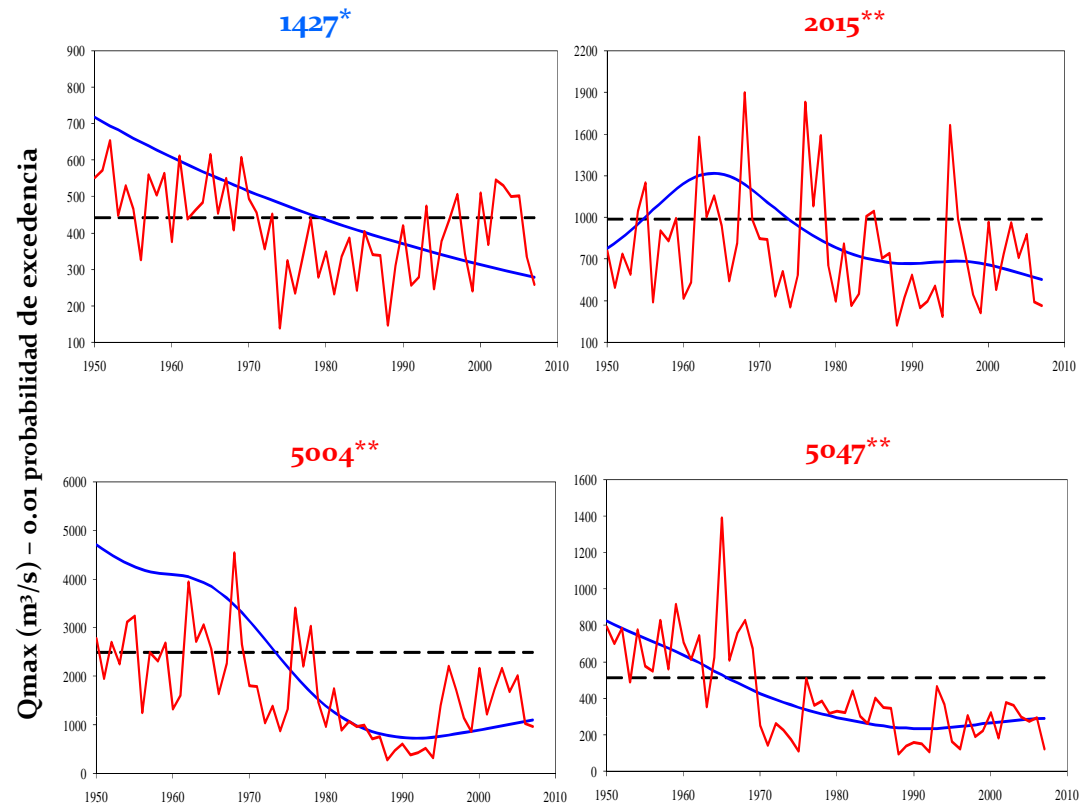
7. Conclusiones

✓ Los resultados sugieren que los eventos para una probabilidad de excedencia de 0.01 bajo condiciones no estacionarias pueden variar dramáticamente

✓ El concepto de periodo de retorno pierde sentido en condiciones no estacionarias

✓ Asumiendo condiciones estacionarias podemos subestimar o sobrestimar crecidas de diseño

* régimen natural
** régimen alterado





Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

Modelos no estacionarios como herramientas predictivas:

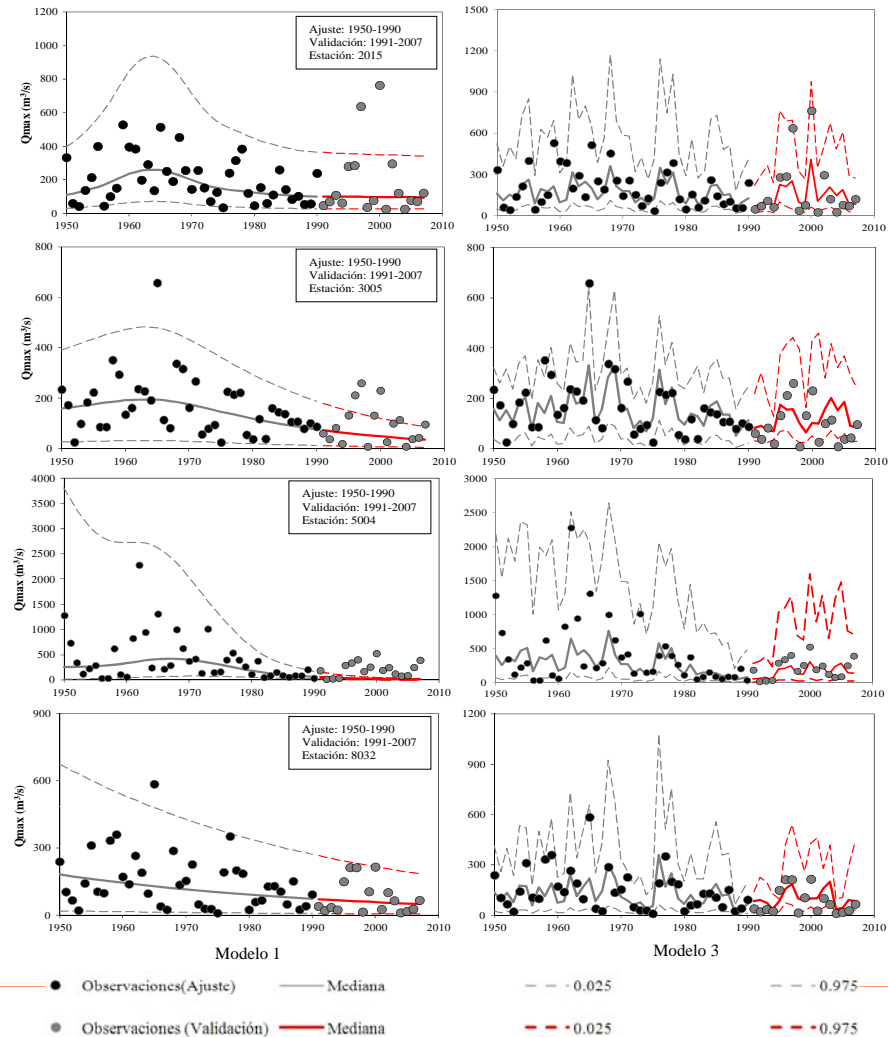
Periodo ajuste: 1950-1990

Periodo validación: 1991-2007

✓ Los modelos de tendencia temporal no describen adecuadamente el comportamiento del régimen de caudales posterior al periodo de ajuste

✓ Las **covariables externas** mejoran los resultados obtenidos en la validación con los modelos no estacionarios

✓ Es necesario analizar los efectos del cambio climático antropogénico en los modos de variabilidad de los patrones de baja frecuencia **ya que incorpora cierto grado de imprevisibilidad y ausencia de robustez en la predicción**



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

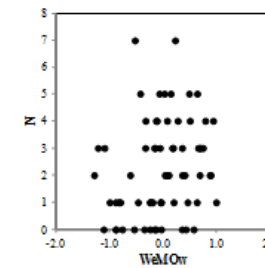
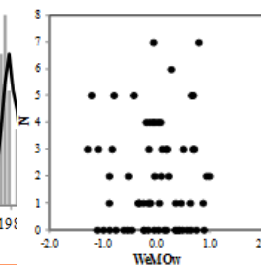
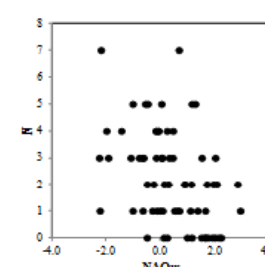
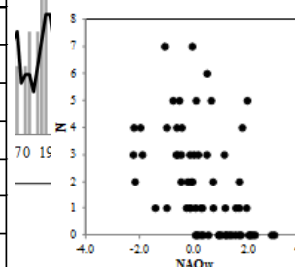
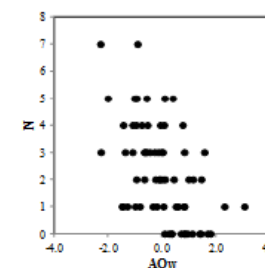
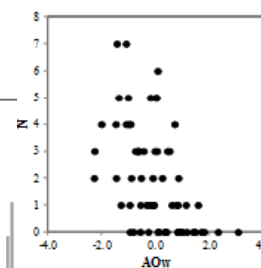
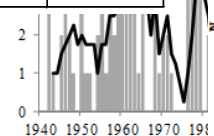
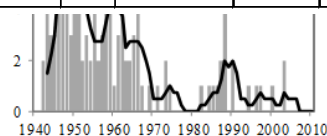
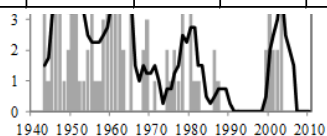
Criterios para la selección de los eventos (N_i)

- i) Establecer el umbral (U) en un valor 4 veces la media de la serie temporal
- ii) Se considera que debe existir al menos una separación de 10 días entre los eventos
- iii) La condición de que no más de 9 eventos por año

Análisis preliminar

Correlaciones entre N_i y los índices climáticos invernales

N_i	Estación	AOw	NAOw	WeMOw	N_i	Estación	AOw	NAOw	WeMOw
	1427	-0.474	-0.522	0.192		5047	-0.439	-0.316	0.300
1734	-0.523	-0.417	0.244	7006	-0.085	-0.089	-0.106		
2002	-0.440	-0.425	-0.046	7029	-0.139	-0.013	0.132		
2015	-0.479	-0.526	0.019	8032	-0.592	-0.536	0.136		
2046	-0.295	-0.326	-0.018	8090	-0.471	-0.516	0.039		
2052	-0.201	-0.291	-0.086	9002	-0.275	-0.236	0.270		
3005	-0.506	-0.441	0.115	9018	-0.295	-0.241	0.077		
4014	-0.418	-0.295	0.198	9071	-0.048	-0.034	0.104		
5004	-0.422	-0.506	-0.085	9096	-0.306	-0.331	0.032		
5029	-0.236	-0.251	-0.135	9111	-0.258	-0.378	-0.086		



- * N (barras) número de eventos de crecidas por años
- * Línea negra: media móvil de periodo de 4 años



Estacionaridad en la tasa de ocurrencia de crecidas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

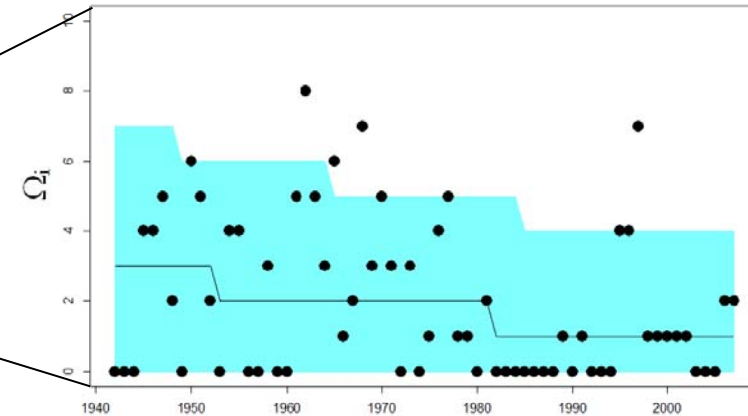
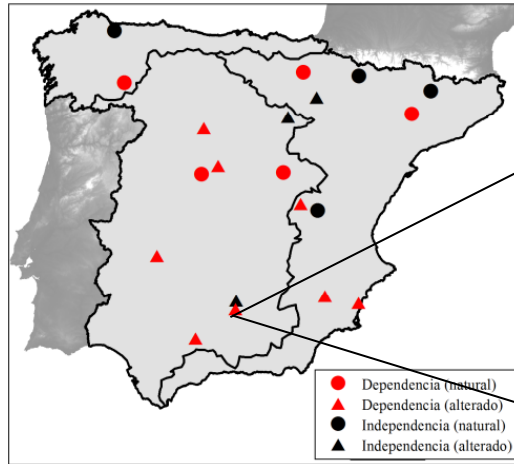
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



Estación	Tasa de frecuencia	Estación	Tasa de frecuencia
1734*	$\Omega_i = \exp(31.86 - 0.015 \cdot t)$	5047**	$\Omega_i = \exp(50.96 - 0.026 \cdot t)$
2015**	$\Omega_i = \exp(18.79 - 0.010 \cdot t)$	7006**	$\Omega_i = \exp(18.06 - 0.009 \cdot t)$
2046*	$\Omega_i = \exp(37.84 - 0.019 \cdot t)$	7029**	$\Omega_i = \exp(95.51 - 0.048 \cdot t)$
2052**	$\Omega_i = \exp(21.63 - 0.014 \cdot t)$	8032**	$\Omega_i = \exp(24.55 - 0.012 \cdot t)$
3005*	$\Omega_i = \exp(29.04 - 0.014 \cdot t)$	9071*	$\Omega_i = \exp(15.74 - 0.007 \cdot t)$
4014**	$\Omega_i = \exp(46.57 - 0.023 \cdot t)$	9096**	$\Omega_i = \exp(25.35 - 0.012 \cdot t)$
5004**	$\Omega_i = \exp(31.55 - 0.016 \cdot t)$		

✓ 13 estaciones representan un modelo de Poisson no homogéneo

✓ Signo negativo en el parámetro de la pendiente en todos los casos



Impacto de la variabilidad climática y los embalses en la tasa de ocurrencia de las crecidas

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

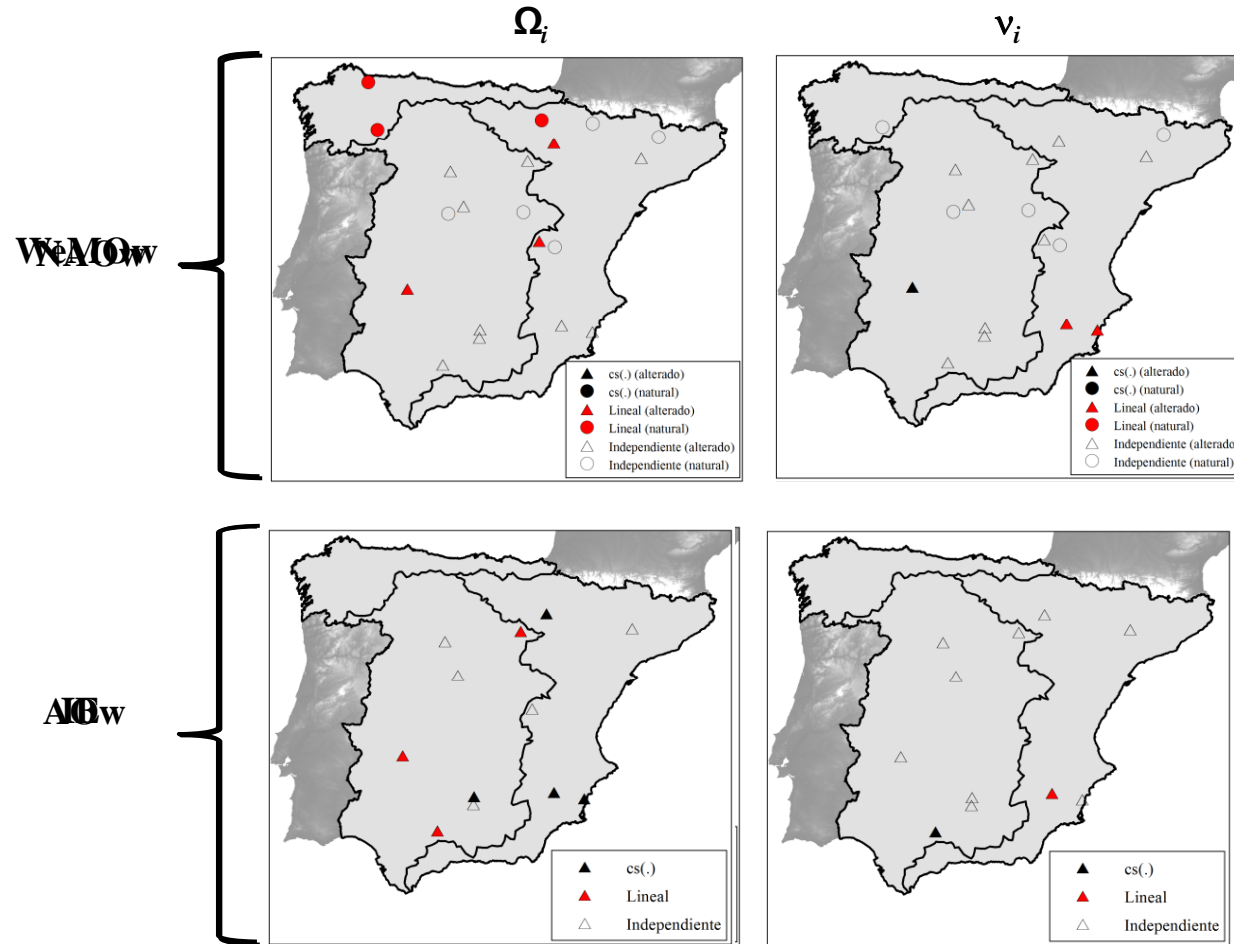
3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis wavelet

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones



- ✓ **Consistente los resultados en la dependencia de la tasa de frecuencia respecto del IE, con respecto a los observados en los caudales máximos anuales**
- ✓ **Una dependencia se presentó con respecto al parámetro de dispersión**
- ✓ **Nula dependencia con respecto al parámetro de dispersión**



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión: Análisis de correlación

5. Teleconexión: Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- Las series temporales de caudales máximos en la España peninsular experimentan desviaciones importantes del supuesto de estacionaridad (cambios y tendencias).
- Es evidente la influencia que tienen los patrones de variabilidad de baja frecuencia (asociados a las precipitaciones invernales de origen advectivo) en la variabilidad interanual de los caudales máximos en las regiones Central y Norte.
- Los impactos de la variabilidad climática natural y el impacto de los embalses pueden explicar en parte los cambios observados en las series temporales de caudales máximos.
- La respuesta de los regímenes de caudales máximos en ríos de la España peninsular a los patrones de baja frecuencia no es homogénea ni en el espacio ni en el tiempo.
- El análisis *wavelet* permitió diagnosticar que la variabilidad en los regímenes de crecidas está fuertemente modulada por los cambios en los patrones de variabilidad climática.



Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionariedad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- La implementación de los modelos de tendencia temporal demostró que los parámetros de las distribuciones adoptadas presentan una alta dependencia del tiempo.
- La incorporación de covariables externas en los modelos estadísticos, demostró que estos pueden describir adecuadamente la variabilidad interanual de los regímenes de crecidas.
- Los modelos al involucrar las formulaciones no paramétricas de suavizado, son más flexibles y tienden a representar mejor la dispersión de los eventos. Sin embargo, este tipo de modelos tienden a ser muy sensible a cambios en las covariables explicativas.
- La modelación de la tasas de ocurrencia de los eventos de crecida por encima de un umbral con base en la distribución de Poisson, mostró que estos describen un procesos no homogéneo. Es decir la tasa de ocurrencia es altamente dependiente del tiempo.
- Los modelos no estacionarios se presentan como una interesante alternativa adicional al análisis de frecuencias de crecidas clásico, permitiendo incorporar los efectos de forzamientos externos.

Índice

1. Introducción

2. Caso de estudio

3. Análisis de la estacionaridad

4. Teleconexión:
Análisis de correlación

5. Teleconexión:
Análisis *wavelet*

6. Modelación no estacionaria

7. Conclusiones

- Extender el estudio incorporando distribuciones adicionales, entre las cuales resultan de amplio interés aquellas que nos permiten modelar eventos producto de dos poblaciones, como es la distribución Valores Extremos de Dos componentes (Rossi et al., 1984).
- Son necesarios estudios más exhaustivos para investigar la cuestión relacionada con la presencia o ausencia de colas pesadas en los eventos de caudales máximos. Esto ante la importancia que tienen éstas en relación con el diseño de las estructuras hidráulicas.
- Sería conveniente el incorporar información No Sistemática (sobre crecidas históricas y paleocrecidas) en la modelación de la frecuencia de crecidas bajo condiciones de no estacionaridad.
- Resulta interesante la modelación de las señales climáticas mediante modelos estocásticos que nos permitan capturar sus patrones de evolución, sería una herramienta de ayuda para obtener predicciones de cuantiles. Otro camino, en esta línea sería el ir de la mano con los estudios de meteorólogos enfocados en mejorar los pronósticos climáticos.
- La reciente propuesta de Salas y Obeykera (2013) en la redefinición de los conceptos de periodo de retorno y riesgo, muestran que la modelación no estacionaria se plantea como una alternativa adecuada en la evaluación del riesgo de estructuras hidráulicas.

Artículos

Publicados

- ✓ López, J. y Francés, F., “Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2304-2343, doi: 10.5194/hessd-17-3189-3203, 2013.

Aceptados para publicación

- ✓ López, J. y Francés, F., “La variabilidad climática en la modelación de la frecuencia de crecidas en la región hidrológica No.10 (Pacífico Mexicano)”. *Tecnología y Ciencias del Agua*.

En revisión

- ✓ López, J. y Francés, F., “Assessing teleconection between low frequency circulation patterns and floods in continental Spanish river”, *Journal of Hydrology*, En revisión.

Congresos

Presentación Oral

- ✓ López, J., Francés, F., Orozco, I. y Barrios, M., “Análisis espacio-temporal de la influencia de los índices de teleconexión en los caudales máximos en la España peninsular”, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Publicado en CD, 15 pp, Montevideo, Uruguay, Noviembre 2010. Presentación Oral.
- ✓ Francés, F. y López J., “Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers using climate and reservoir indexes as external covariates: Floodmed project”. CIRCLE-2 SHARE Workshop, Response to extreme water related events. Madrid, España. 22-23, October 2012. Presentación Oral.
- ✓ López, J. y Francés, F., “La variabilidad climática de baja frecuencia y los cambios inducidos por embalses en la modelación no estacionaria de la frecuencia de crecidas en la España peninsular”. III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos de inundación. Valencia, España, Octubre 2013. Presentación Oral.

Presentación poster

- ✓ López, J. y Francés, F., “Correlation analysis between the North Atlantic Oscillation and Western Mediterranean Oscillation, with floods in Spain”, VII Asamblea General de la European Geosciences Union, Ed. *Geophysical Research Abstracts* en CD, Vol.12, EGU2010-13616, ISSN 1029-7006, Viena, Austria, Abril, 2010. Presentación Poster.
- ✓ López, J. y Francés, F., “Possible influence of large-scale climate indices on the variability of maximum streamflows in rivers of Peninsular Spain”, VII Asamblea General de la European Geosciences Union, Ed. *Geophysical Research Abstracts* en CD, Vol.12, EGU2010-13616, ISSN 1029-7006, Viena, Austria, Abril, 2011. Presentación Poster.
- ✓ López, J. y Francés F., “Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers using climate and reservoir indexes as external covariates”. 3rd STAHY International Workshop on Statistical Methods for Hydrology and Water Resources Management. Túnez, Túnez. 1-2 October 2012. Presentación Poster.

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DEL AGUA Y MEDIOAMBIENTAL

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido subvencionado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (**CONACYT**), a través de las becas para estudios de doctorado.

Proyecto FLOODMED

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València

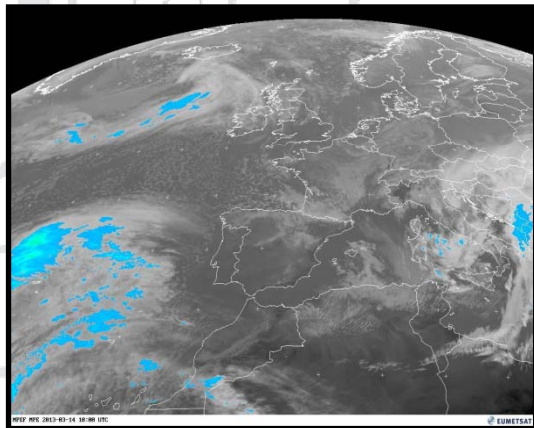
¡Gracias por su atención!

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MODELACIÓN DEL RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS EN RÍOS DE LA ESPAÑA PENINSULAR EN UN CONTEXTO NO ESTACIONARIO

Autor: Jesús López de la Cruz
(jeslpede@posgrado.upv.es)

Director: Félix Francés García
(ffrances@hma.upv.es)



Valencia, Octubre 2013