

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.

PROYECTO FINAL DE CARRERA - TIPO II

Combinación entre los temporales de orígenes
marino y terrestre para la caracterización
extremal de las inundaciones costeras.
Aplicación a la desembocadura del Río Girona.

Autor: Estefanía Fernández Herrero

Tutores: Félix Francés García
José Aguilar Herrando

ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**
- **REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE**
- **CASO DE ESTUDIO: EL RÍO GIRONA**
- **MODELO ESTADÍSTICO**
 - **ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN**
 - **ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE**
 - **COMBINACIÓN TEMPORALES MARINOS - TERRESTRES**
- **RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Inundación:

Fenómeno natural por el cual el agua sumerge terrenos que normalmente se encuentran libres de ella.

Objetivos:

Mejorar los estudios tradicionales sobre riesgos de inundación en zonas costeras



Combinación de temporales marinos y tormentas terrestres.

REVISIÓN ESTADO DEL ARTE

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE NORMATIVA Y MARCO LEGISLATIVO

2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de inundación.

Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA).

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS RELACIONADOS

Interacción estadística río-mar

- Tratamiento independiente.
- Nivel constante del nivel del mar.

ROM 0.2-90: Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.

- Combinaciones entre variables.

Defra/Environmet Agency (2003, 2005).

Proyecto Integrado *FLOODsite* (2008).

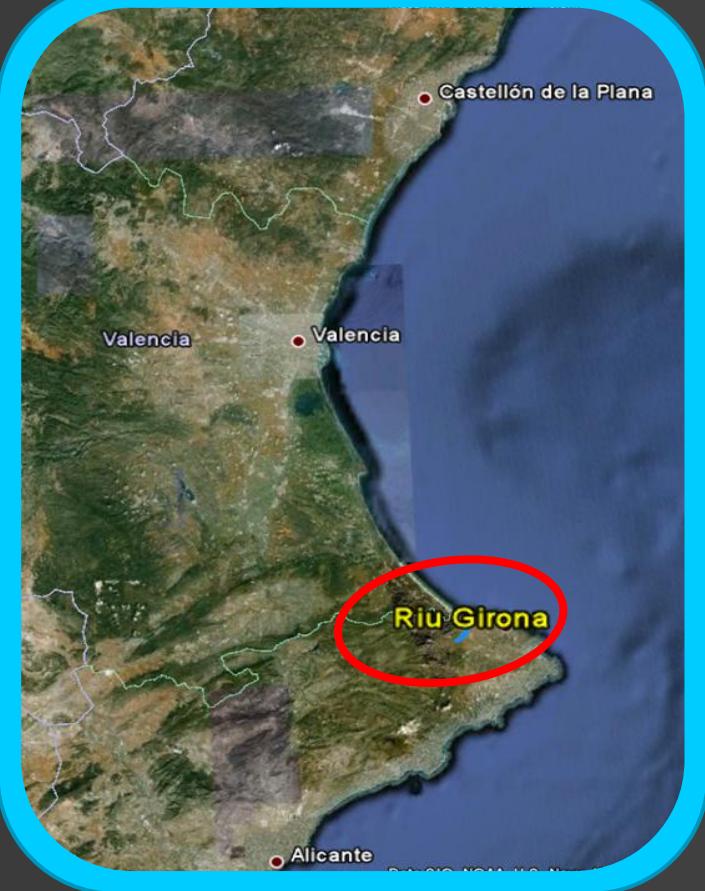
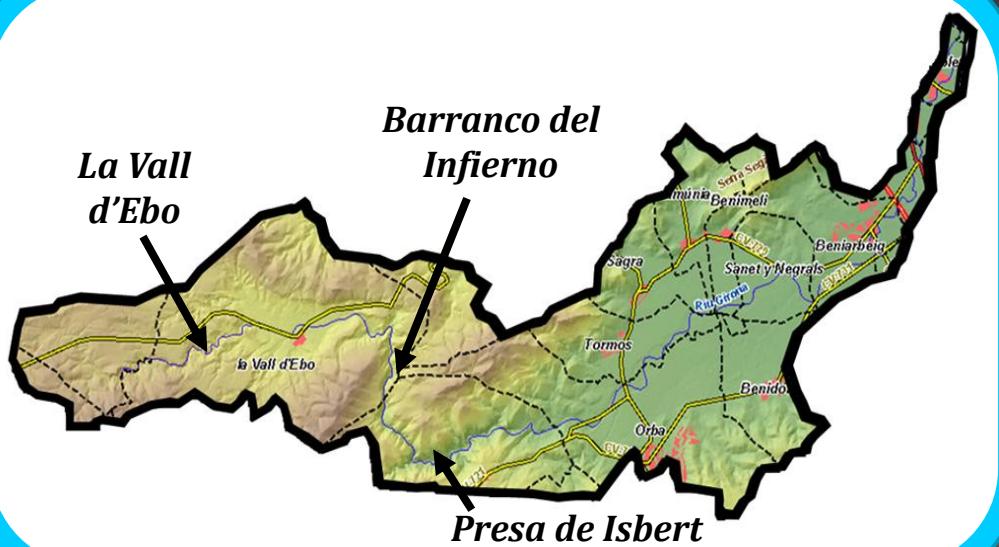
CASO DE ESTUDIO: RÍO GIRONA

CASO DE ESTUDIO: EL RÍO GIRONA CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

Demarcación Hidrográfica del Júcar
Comarca Marina Alta.

40 km de cauce principal.

Cuenca hidrográfica 111 km²



Climatología

Precipitación media 600mm

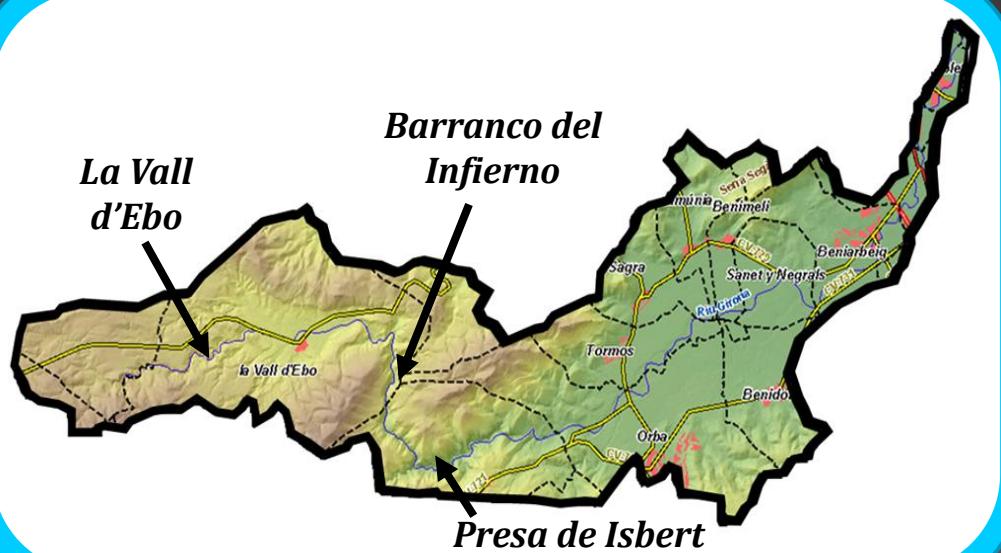
T^a media 18⁰C

CASO DE ESTUDIO: EL RÍO GIRONA CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

Demarcación Hidrográfica del Júcar
Comarca Marina Alta.

40 km de cauce principal.

Cuenca hidrográfica 111 km²



Climatología

Precipitación media 600mm

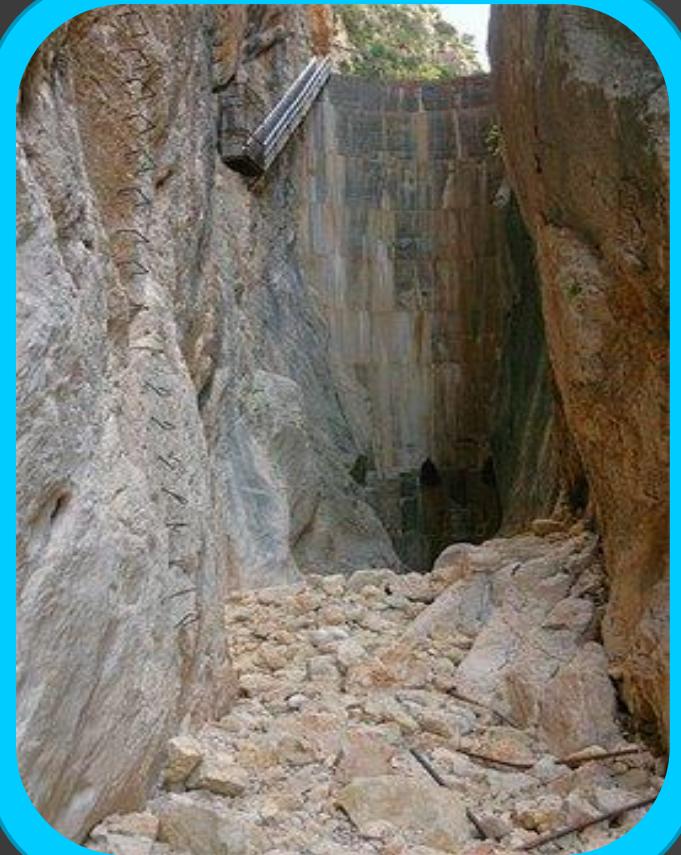
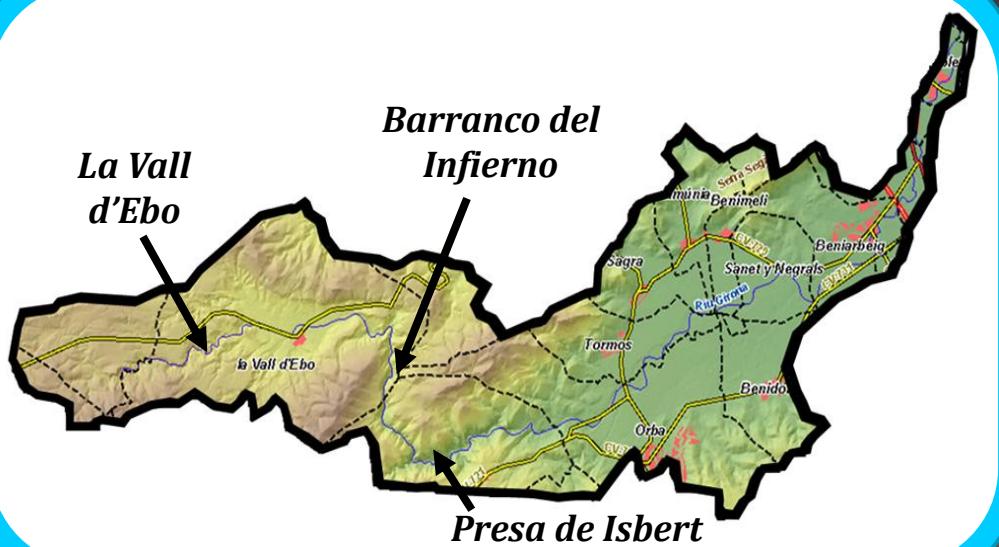
T^a media 18ºC

CASO DE ESTUDIO: EL RÍO GIRONA CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

Demarcación Hidrográfica del Júcar
Comarca Marina Alta.

40 km de cauce principal.

Cuenca hidrográfica 111 km²



Climatología

Precipitación media 600mm

T^a media 18°C

CASO DE ESTUDIO: EL RÍO GIRONA PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES.

Régimen hidrológico

- Lluvias torrenciales
- Elevada pendiente del terreno
- Suelos estrechos en laderas
- Cultivos en el fondo del valle



Inundaciones registradas

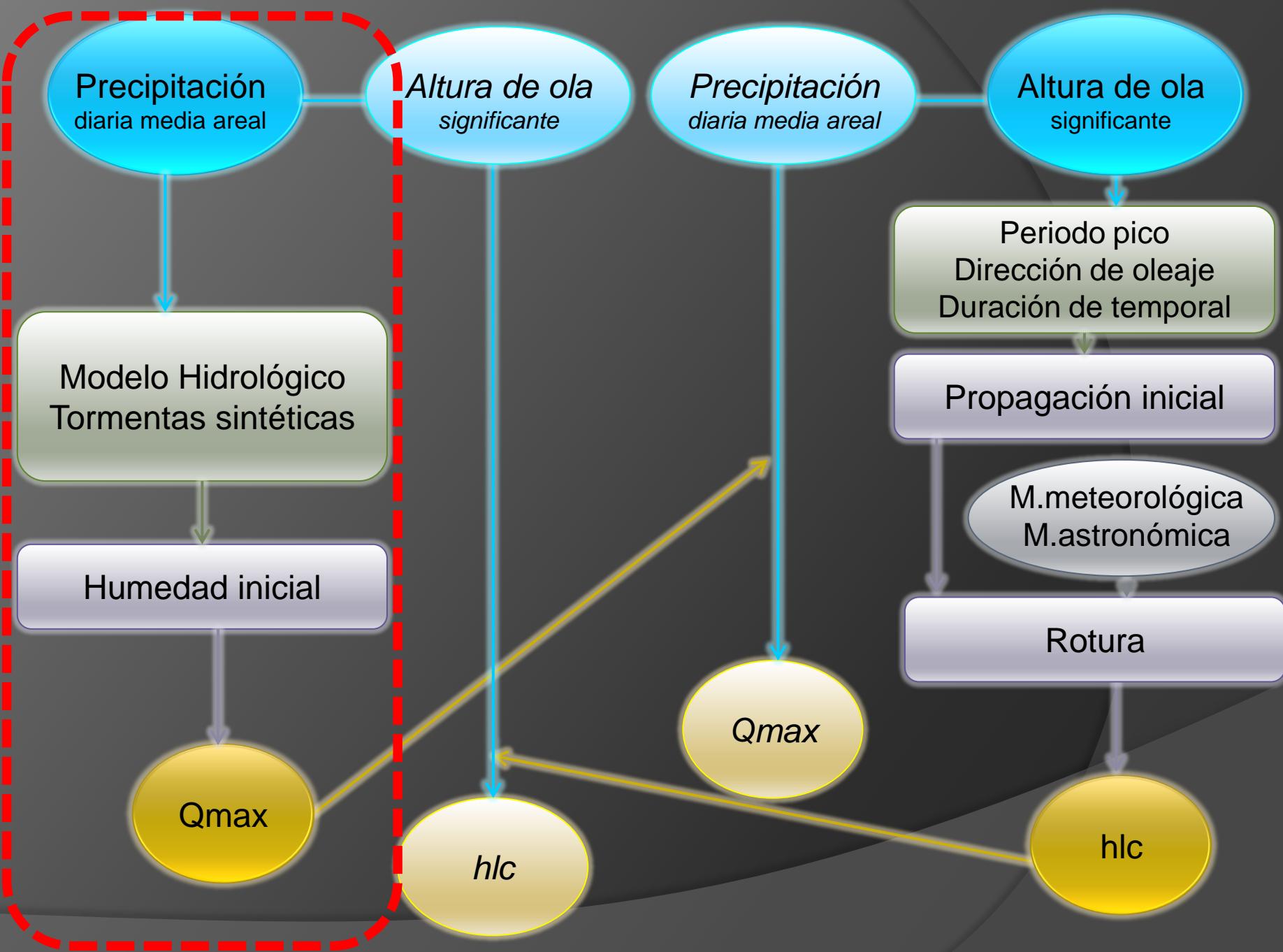
- 1896-99 distintas avenidas
- 30 de septiembre de 1919
- noviembre de 1941 y 1947
- noviembre de 1985
- 12 de octubre de 2007

MODELO ESTADÍSTICO



MODELO ESTADÍSTICO (I)

ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN
DIARIA MEDIA AREAL.
OBTENCIÓN DE CAUDALES



ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA MEDIA AREAL. PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Agencia Estatal de Meteorología

Precipitación diaria

14 estaciones pluviométricas

Longitud series: 1942 – 2010

Confederación Hidrográfica del Júcar

Intensidad - cinco minutos

4 estaciones pluviométricas

Longitud series: 1990 - 2009

Polígonos de Thiessen

Precipitación diaria media areal



ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA MEDIA AREAL. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis de variables

Precipitación diaria media areal $> 30\text{mm}$: *Generalizada de Pareto (GDP)*.

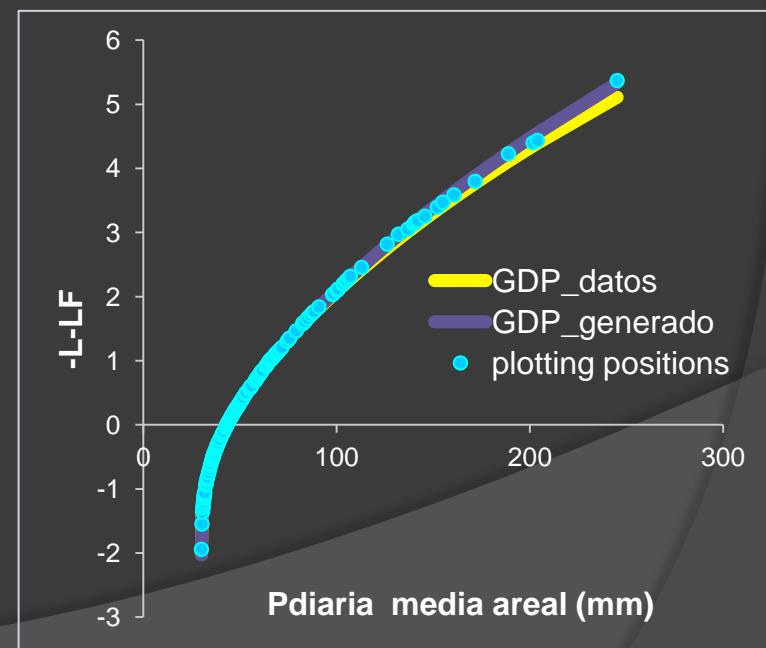
Tiempo entre tormentas: *Función de distribución empírica*.



Generación de tormentas

Montecarlo: 1000 años de datos.

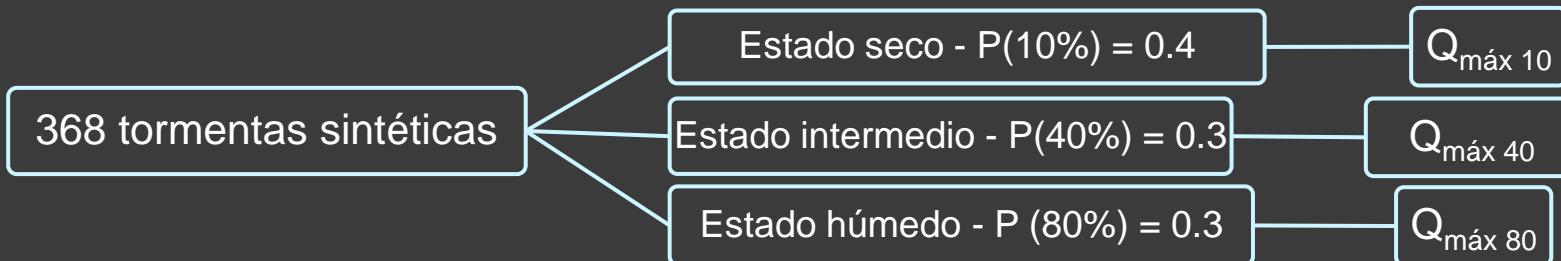
Pdiaria media areal – Fecha.



ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA MEDIA AREAL. ASIGNACIÓN DE CAUDALES EN EL RÍO GIRONA

Datos disponibles

Estudio para la “Redacción del Plan Director de Defensa contra las Avenidas en La Comarca de la Marina Alta (Alicante)”.



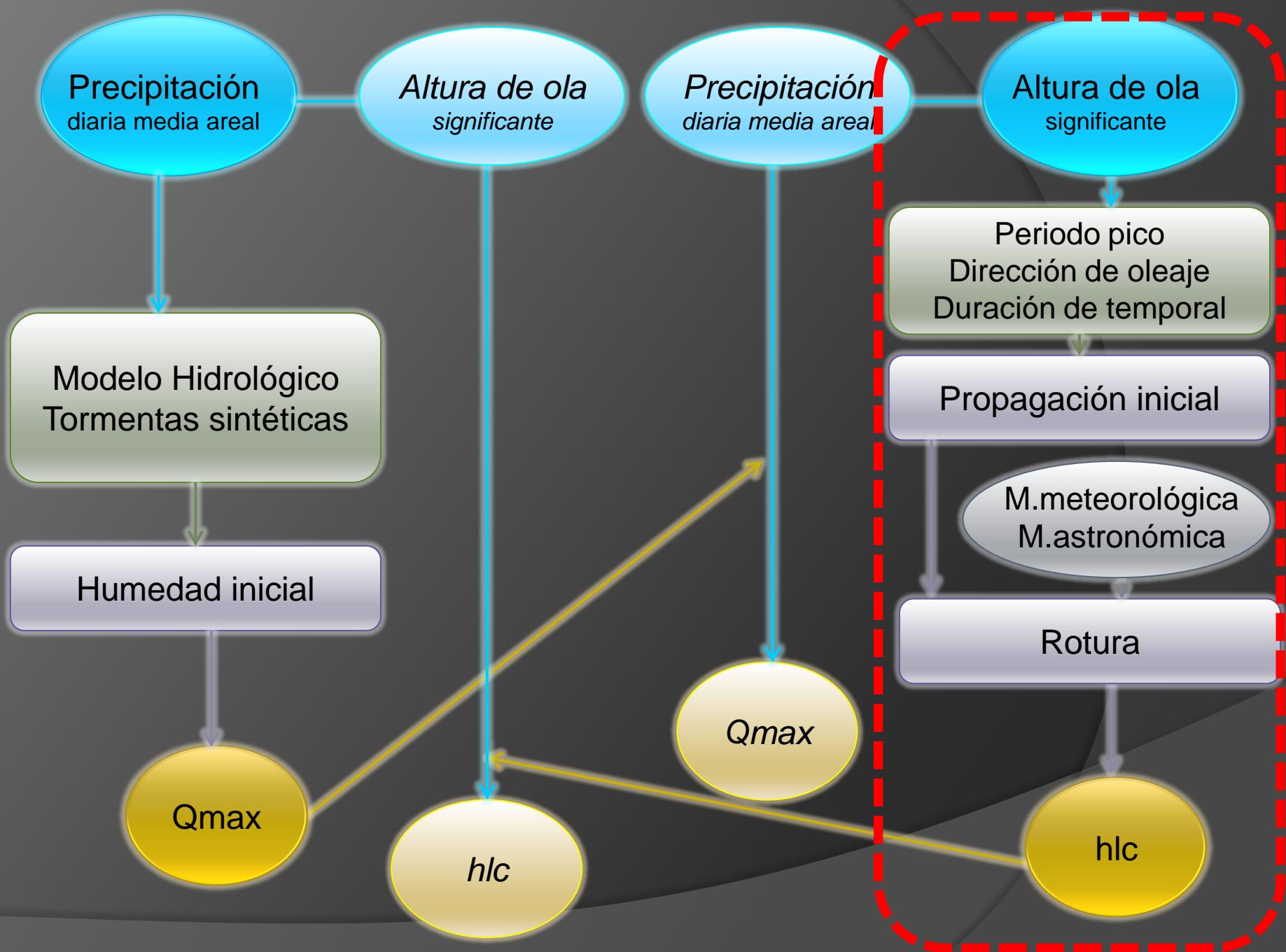
Asignación de caudales

Pd. gen.	nº aleatorio	Hi%	Qmax
53.24	0.400	10	2.61
55.50	0.816	80	1.2808
33.20	0.719	80	0.0518
96.25	0.363	10	12.5753
57.86	0.891	80	2.9816
64.73	0.089		

Código	Hi%	Evto.	Pd (mm)	Qmax (m ³ /s)
10--1-106	10	1-106	94.31584	8.8964
10--1-183	10	1-183	94.91647	5.5775
10--1-170	10	1-170	96.2002	12.5753
10--1-227	10	1-227	96.54573	1.6484
10--1-630	10	1-630	96.65278	7.0694
10--1-055	10	1-055	96.67741	4.5513
10--1-590	10	1-590		

MODELO ESTADÍSTICO (II)

ANÁLISIS DE OLEAJE Y PROPAGACIÓN HASTA LA COSTA



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

PREPARACIÓN DE LOS DATOS PARA SU ANÁLISIS.

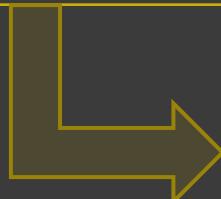
Red Mareógrafos -Puertos del Estado

Nivel del mar

Marea astronómica

Marea meteorológica

Código	Nombre	Latid	Longitud	Datos
3652	Valencia (Acústico)	39° 26' 31" N	0° 18' 40" W	10/1992 - 11/2006
3651	Valencia (Radar)	39° 26' 31" N	0° 18' 40" W	01/2007 - 11/2009



Selección mareógrafo 3652 Valencia (acústico)

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR. PREPARACIÓN DE LOS DATOS PARA SU ANÁLISIS.

Red Mareógrafos -Puertos del Estado



SIMAR-44 Proyecto Europeo HIPOCAS

Marea meteorológica
Altura de ola significante
Periodo de pico
Dirección media de oleaje

Selección del nodo 2048032

Correlación entre variables
Test de correlación cruzada
Marea meteorológica – Precipitación
15 km de la desembocadura

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

Temporal marino: datos asociados a alturas de ola significante superiores a 2.5 m dispuestos de forma consecutiva o con una separación máxima de 9 horas.

Variables características



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

Análisis

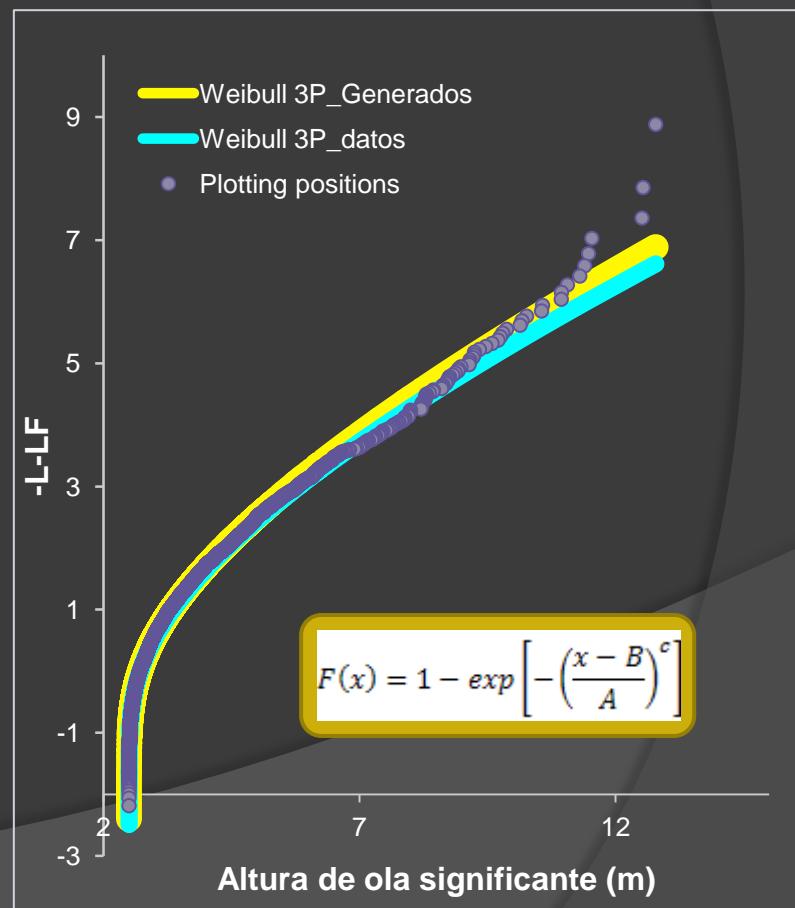
Máximos relativos sobre el Umbral

1. Ajustes Gumbel y Weibull -3P.
2. Weibull -3P con $B = 2.431$.
3. Modificado para $B = 2.5$.

Generación : Montecarlo

1. Generación nº aleatorios 0-1.
2. Correspondencia con Weibull-3P.
3. Obtención de la altura de ola.

Método ROM 0.3-91 Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en el Litoral español y desarrollado por Goda (1988).



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

PERIODO DE PICO DE OLEAJE

Análisis

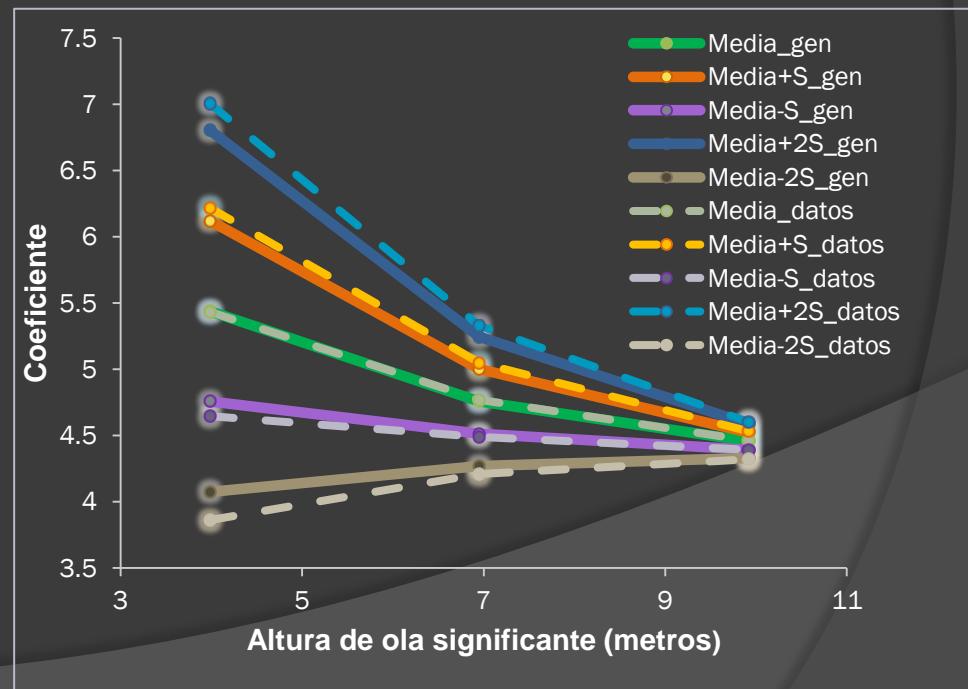
1. Cálculo de coeficientes.
2. Clases en función de H_s .
3. Intervalos de confianza
66.67% y del 90%.

Generación

1. Hipótesis de Normalidad.
2. Límites intervalos del 90%.
3. Asignación por Montecarlo.
4. Cálculo del periodo de pico.

Relación Periodo de pico-altura de ola de ROM 0.3-91. en Valencia.

$$T_p = (5 \sim 6.3) \sqrt{H_s}$$



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

DIRECCIÓN DE OLEAJE

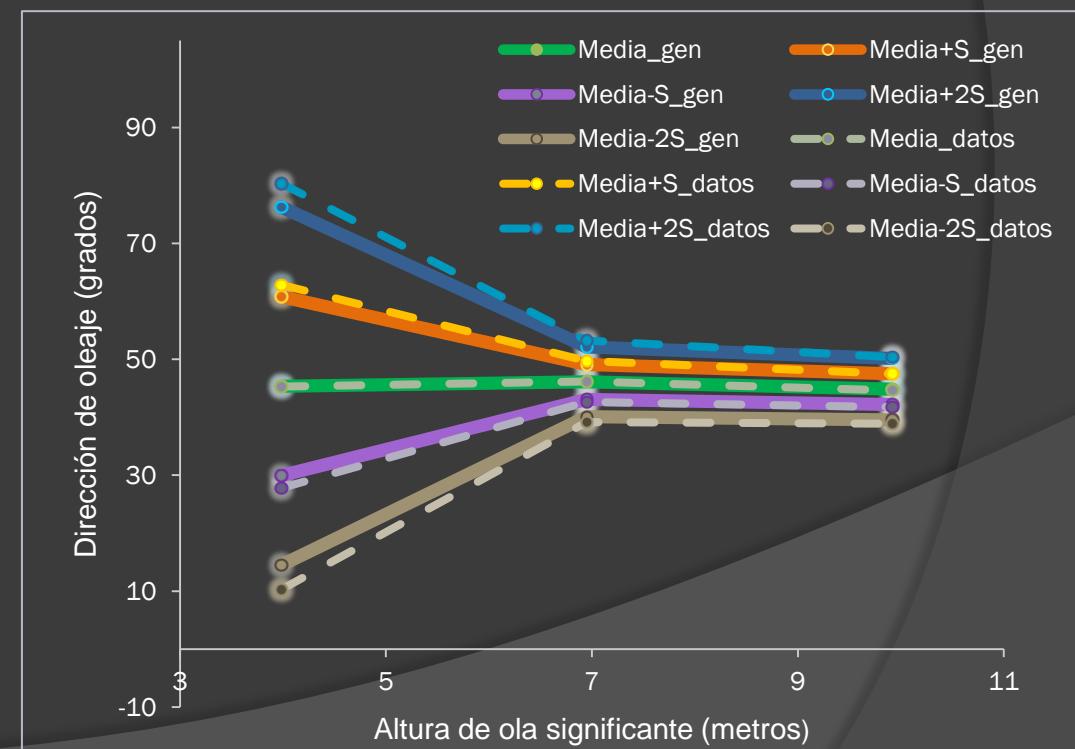
Análisis

1. Clases en función de Hs.
2. Intervalos de confianza
66.67% y del 90%.

Generación

1. Hipótesis de normalidad.
2. Límites intervalos del 90%.
3. Asignación por Montecarlo.

Se quiere dirección de oleaje asociada a la altura de ola de cada temporal.



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

DURACIÓN DEL TEMPORAL

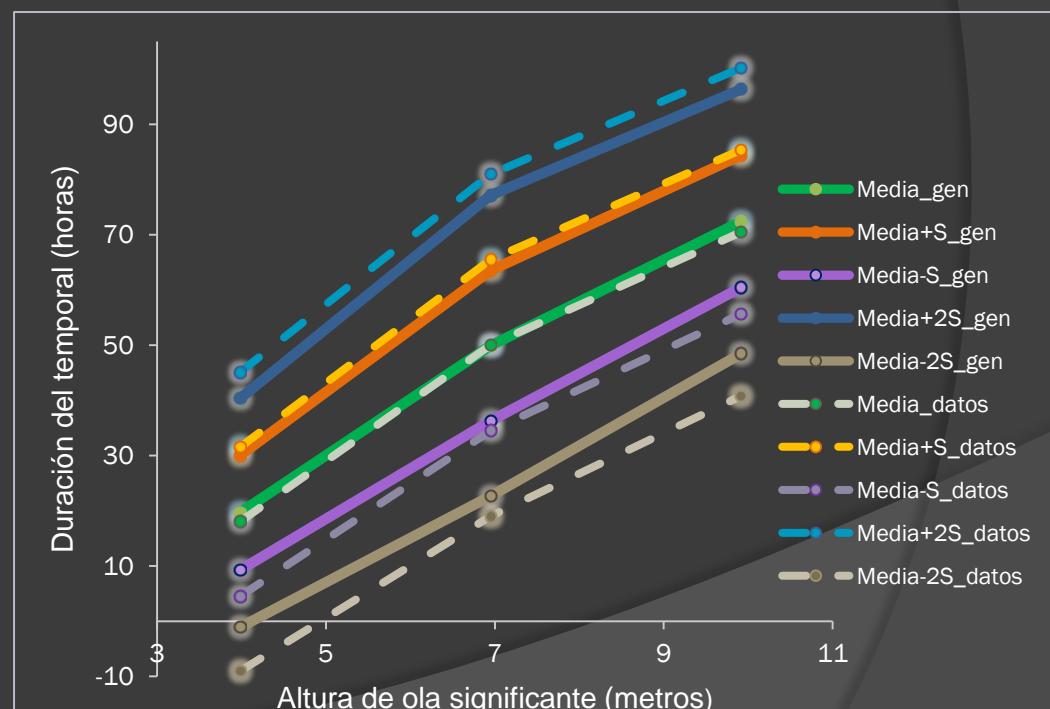
Se quiere la duración asociada a la altura de ola de cada temporal.

Análisis

1. Clases en función de Hs.
2. Intervalos de confianza:
66.67% y 90%

Generación

1. Hipótesis de Normalidad.
2. Límites intervalos del 90%.
3. Asignación por Montecarlo.



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

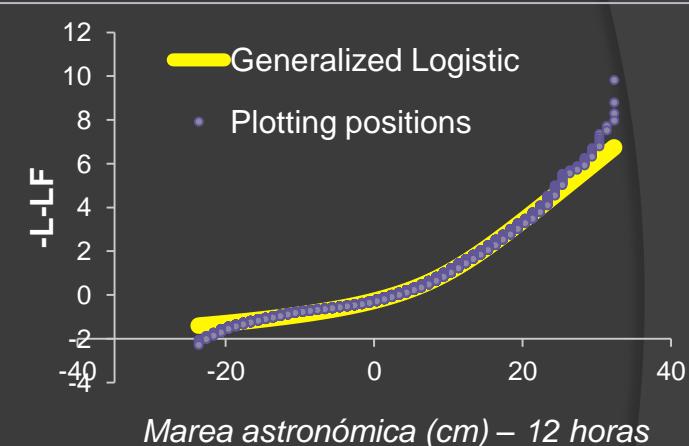
ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

MAREA ASTRONÓMICA

Análisis – REDMAR

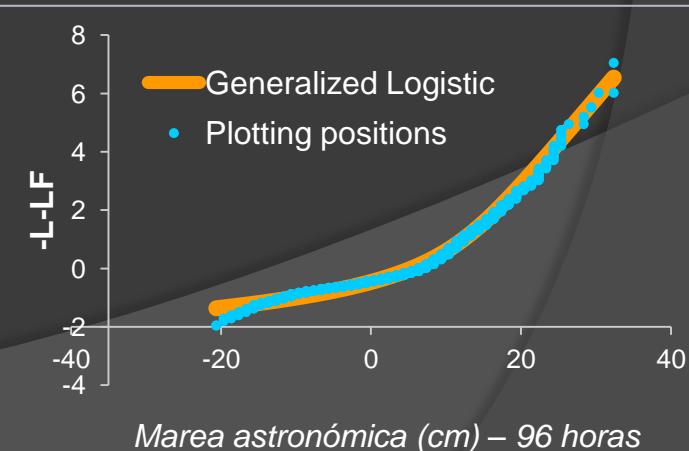
1. Normalización de los datos
2. Series de máximos
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 36, 48, 72 y 96 h.
3. Análisis estadístico: *Generalized Logistic*

Relación marea astronómica con temporales marinos: duración (horas).



Generación

1. Generación números aleatorios 0-1.
2. Duración del temporal - nº aleatorio.
3. Marea para duraciones inferior y superior.
4. Interpolación lineal → marea astronómica.



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

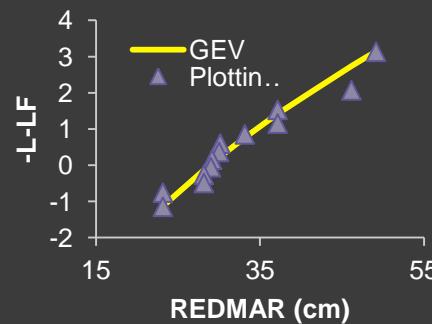
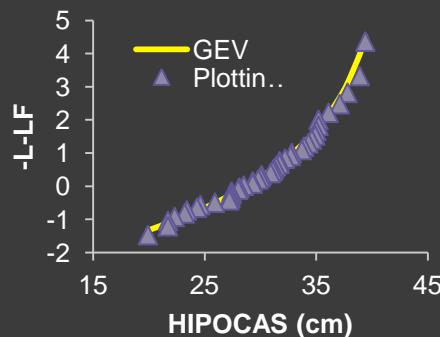
ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

MAREA METEOROLÓGICA (I)

Calibración de los datos SIMAR -44

A partir de los datos REDMAR

1. Máximos anuales de cada serie → GEV.



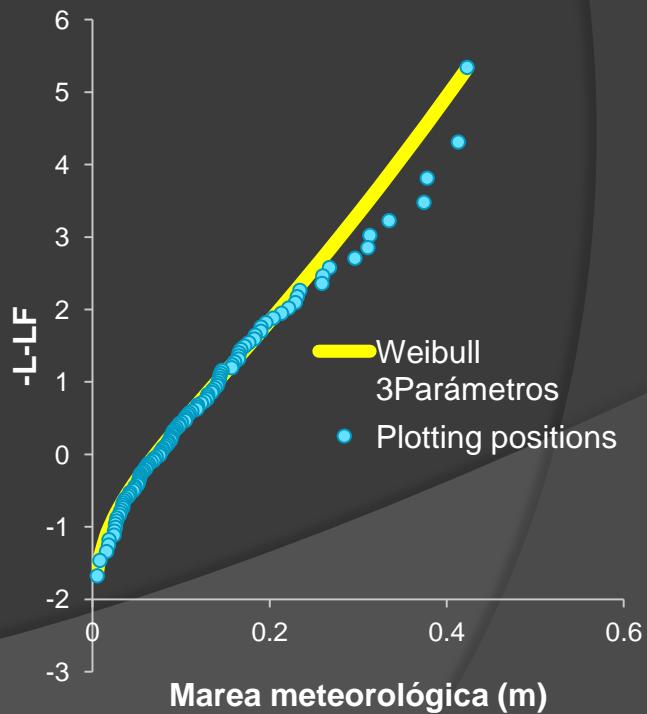
2. Correlación entre cuantiles

$$M_{\text{meteor}} \text{HIPOCAS CALIBRADA} = 0.8228 \cdot (M_{\text{meteor}} \text{HIPOCAS})^{1.0785}$$

3. Corrección de los datos SIMAR-44

Análisis

Weibull - 3 Parámetros



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

MAREA METEOROLÓGICA (II)

Generación - Distribuciones bivariadas (Hashino, 1991)

1. Distribuciones marginales
2. Características estadísticas
3. Función de distribución condicionada
4. Generación nº aleatorios 0-1.
5. $(n^o \text{ aleatorio}, H_{\text{generada}}) \sim \text{Función de distribución}$
6. Obtención de marea meteorológica

Marea meteorológica

Altura de ola

X_1 marea meteorológica
 X_2 altura de ola significante

C_0, C_1, C_2 y C_{12} función de las
características estadísticas

$$F_{X_1|X_2}(x_1|x_2) = F_{X_1}(x_1)[C_0 + C_2x_2] + [C_1 + C_{12}x_2] \int_{-\infty}^{x_1} u f_{X_1}(u) du$$

Coeficiente de
correlación

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE VARIABLES

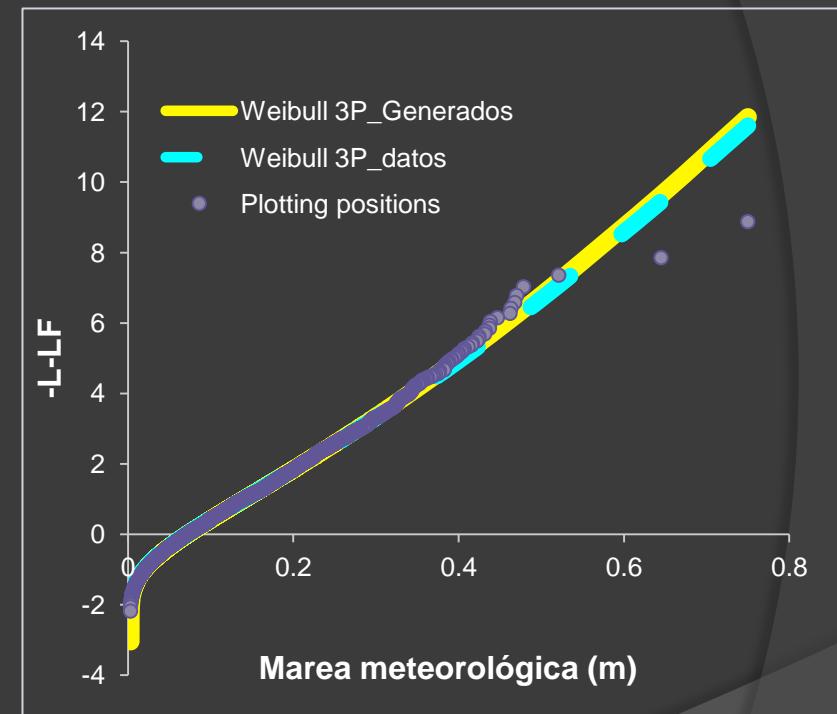
MAREA METEOROLÓGICA (II)

Generación - Distribuciones bivariadas

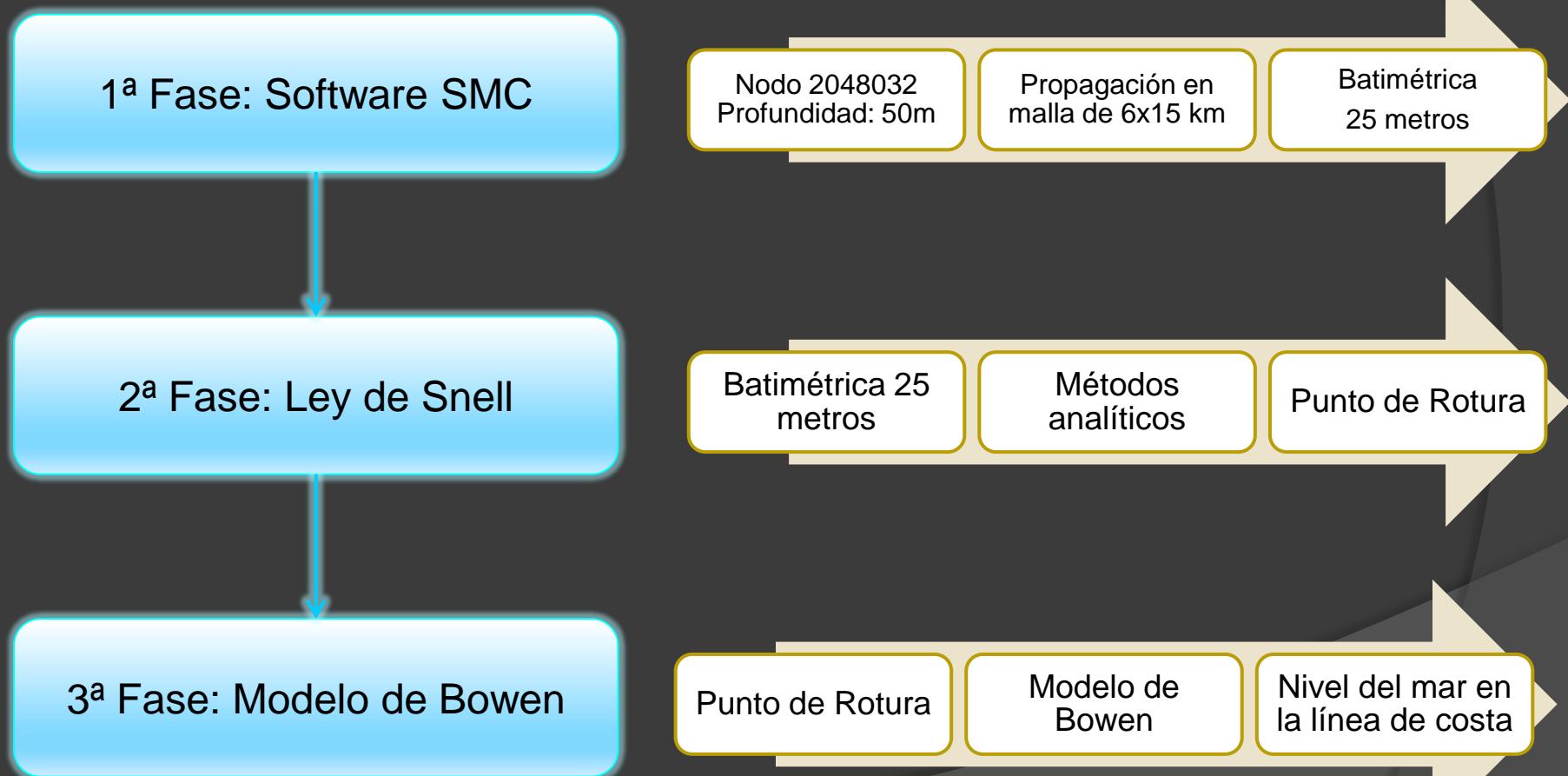
1. Distribuciones marginales
2. Características estadísticas
3. Función de distribución condicionada

$$F_{X_1|X_2}(x_1|x_2) = F_{X_1}(x_1)[C_0 + C_2x_2] + [C_1 + C_{12}x_2] \int_{-\infty}^{x_1} u f_{X_1}(u) du$$

4. Generación nº aleatorios 0-1.
5. $(n^o \text{ aleatorio}, H_{\text{generada}}) \sim \text{Función de distribución}$
6. Obtención de marea meteorológica



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

1^a Fase: Software SMC

Nodo 2048032
Profundidad: 50m

Propagación en
malla de 6x15 km

Batimétrica
25 metros

Combinaciones pre-calculadas

Altura de ola: 1 metro.

Dirección: 10°, 25°, 40°, 45°, 50°, 55°, 67.5°, 80° N-E.

Periodo de oleaje: 6, 8, 10, 12 y 14 segundos.

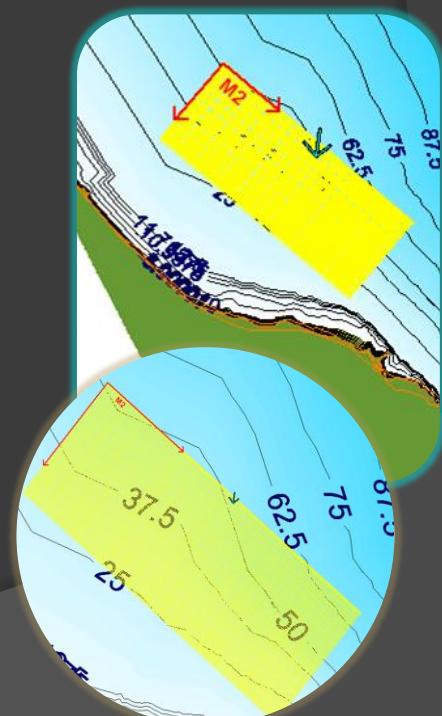
Resultados - Salida de malla

Altura de ola



Interpolación temporales

Dirección de oleaje



ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR.

PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

2^a Fase: Ley de Snell

Batimétrica 25
metros

Métodos
analíticos

Punto de Rotura

Problema de refracción, con hipótesis de batimétricas paralelas hasta el punto de rotura de la ola.

Coef. Asombramiento
Coef. Refracción
Hmedia cuadrática
Dirección de oleaje
Set-down

Propagación hasta
punto de rotura
 $H/d > 0.8$

Cada temporal:
Nivel del mar
Profundidad
Dirección de oleaje

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

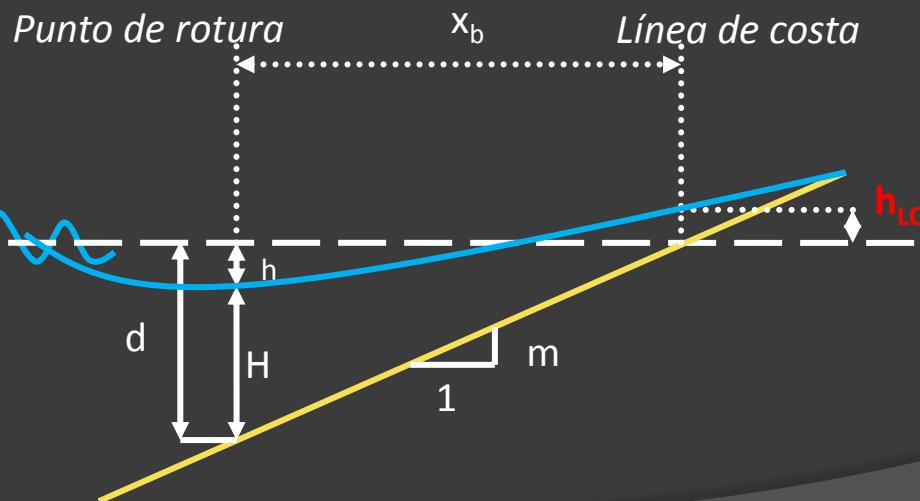
3^a Fase: Modelo de Bowen

Punto de Rotura

Bowen (1969)

Nivel del mar en
la línea de costa

Set-up del Modelo de Bowen (1969).



Datos de rotura
Datos temporal

- Periodo de pico
- Marea astronómica
- Marea meteorológica



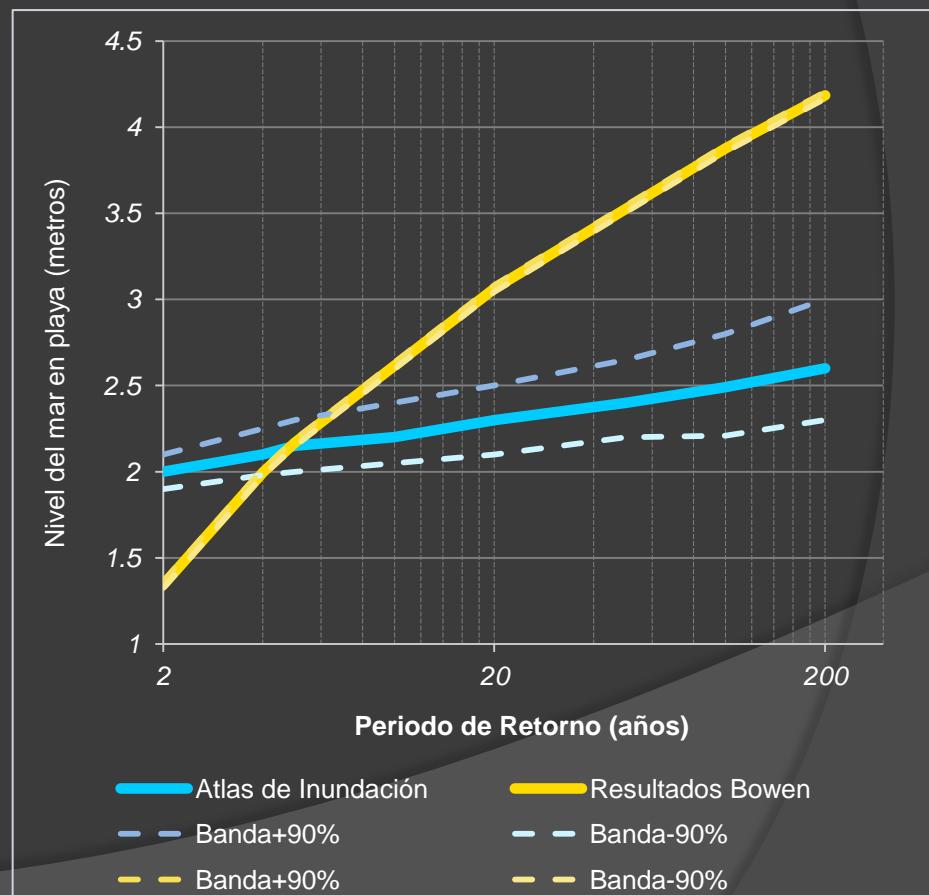
**Nivel del mar
en la línea de
costa**

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE Y NIVELES DEL MAR. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Nivel del mar en la línea de costa

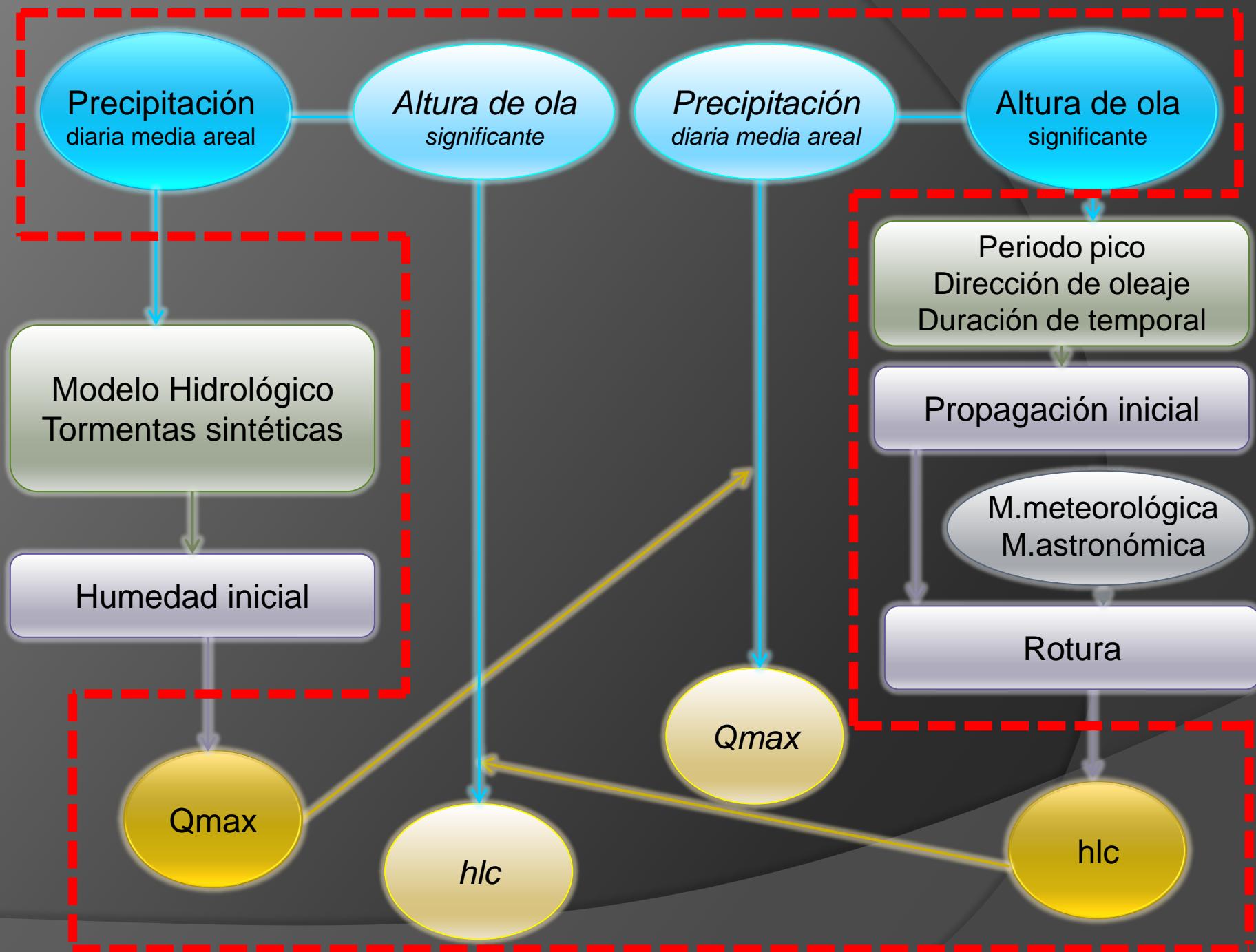
Análisis estadístico de los niveles del mar en la línea de costa máximos anuales

Documento Temático Cota de Inundación: Atlas de Inundación en el Litoral Peninsular Español



MODELO ESTADÍSTICO (III)

COMBINACIÓN DE
TEMPORALES MARINOS Y
TORMENTAS TERRESTRES



COMBINACIÓN DE TEMPORALES MARINOS Y TORMENTAS TERRESTRES

CORRELACIÓN ALTURA DE OLA - PRECIPITACIÓN DIARIA MEDIA AREAL

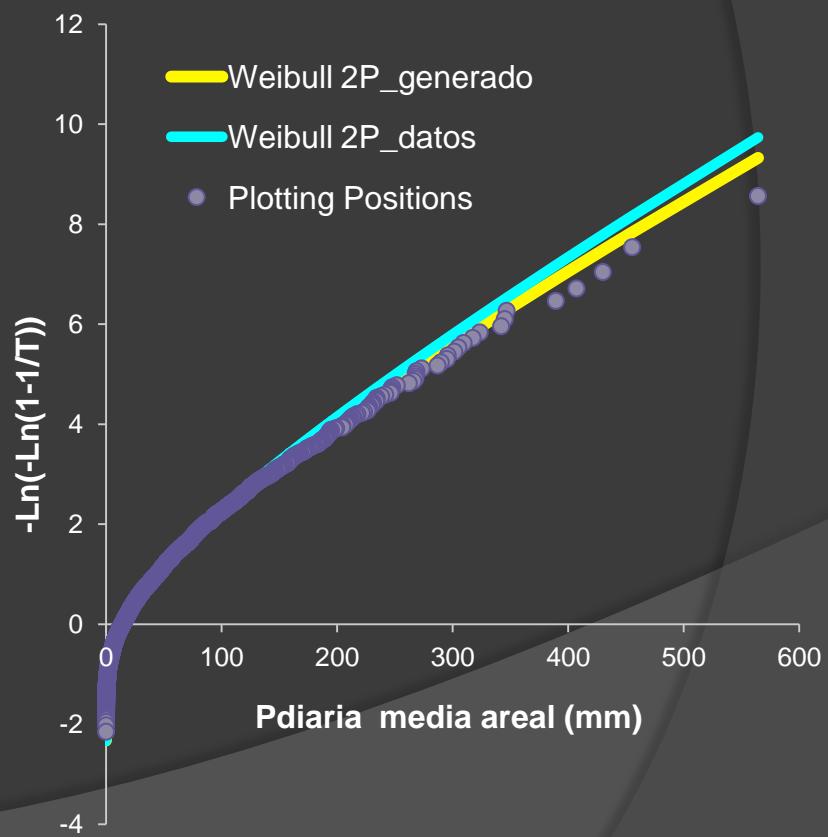
Test de correlación cruzada



Existe correlación

Generación de tormentas asociadas a los temporales marinos obtenidos

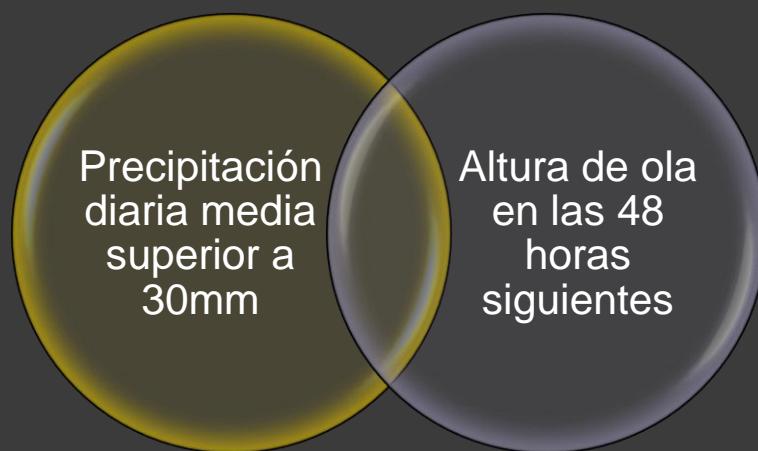
Métodos bivariados



COMBINACIÓN DE TEMPORALES MARINOS Y TORMENTAS TERRESTRES

CORRELACIÓN ALTURA DE OLA - PRECIPITACIÓN DIARIA MEDIA AREAL

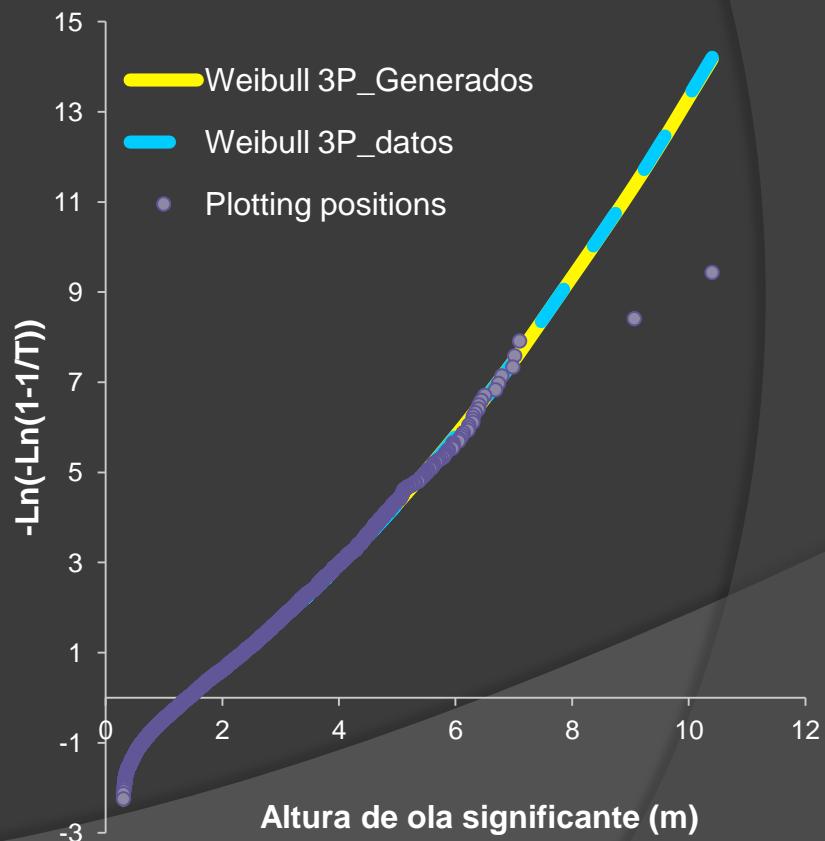
Test de correlación cruzada

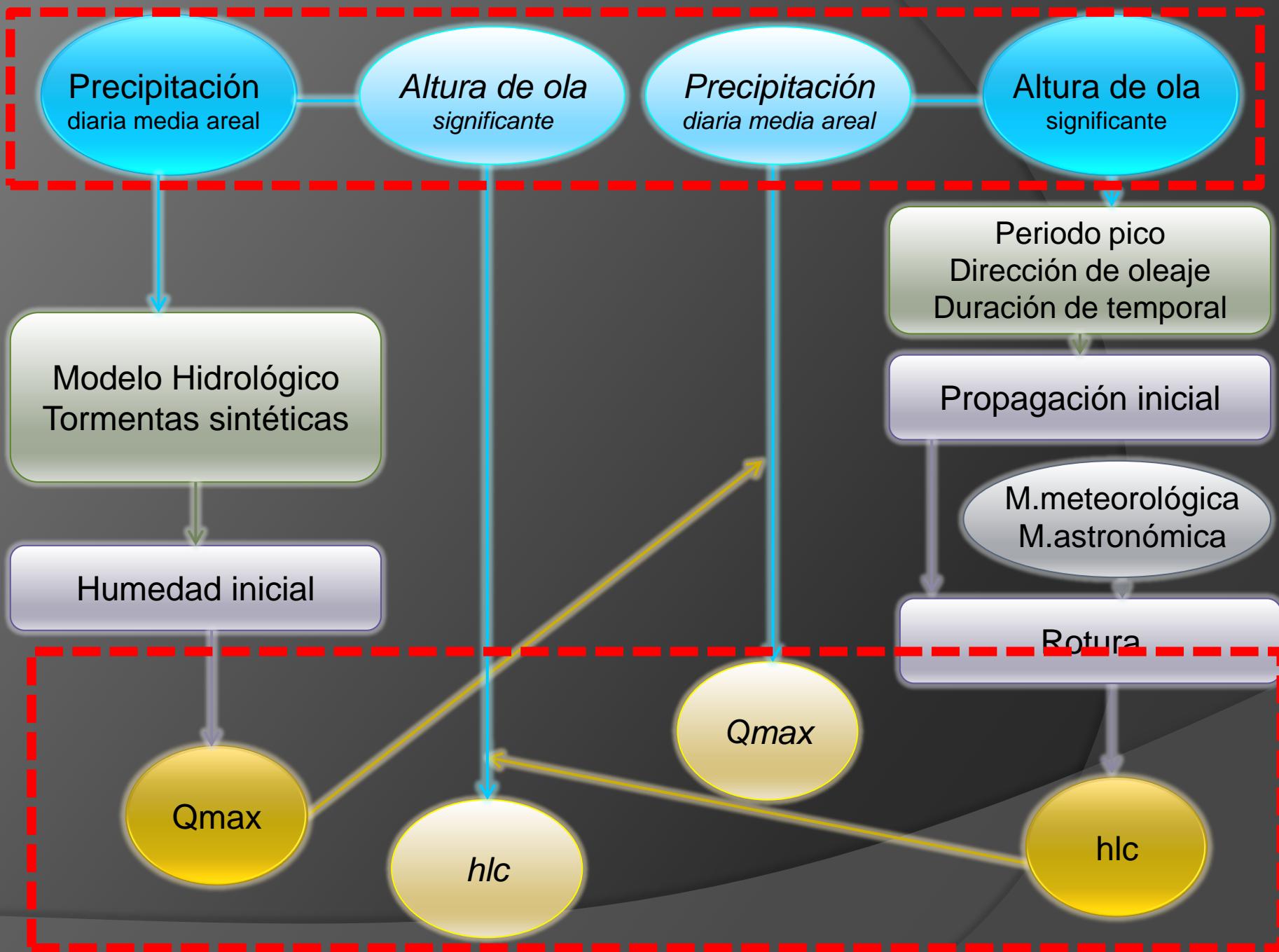


Existe correlación

Generación de temporales asociados a las tormentas terrestres obtenidas

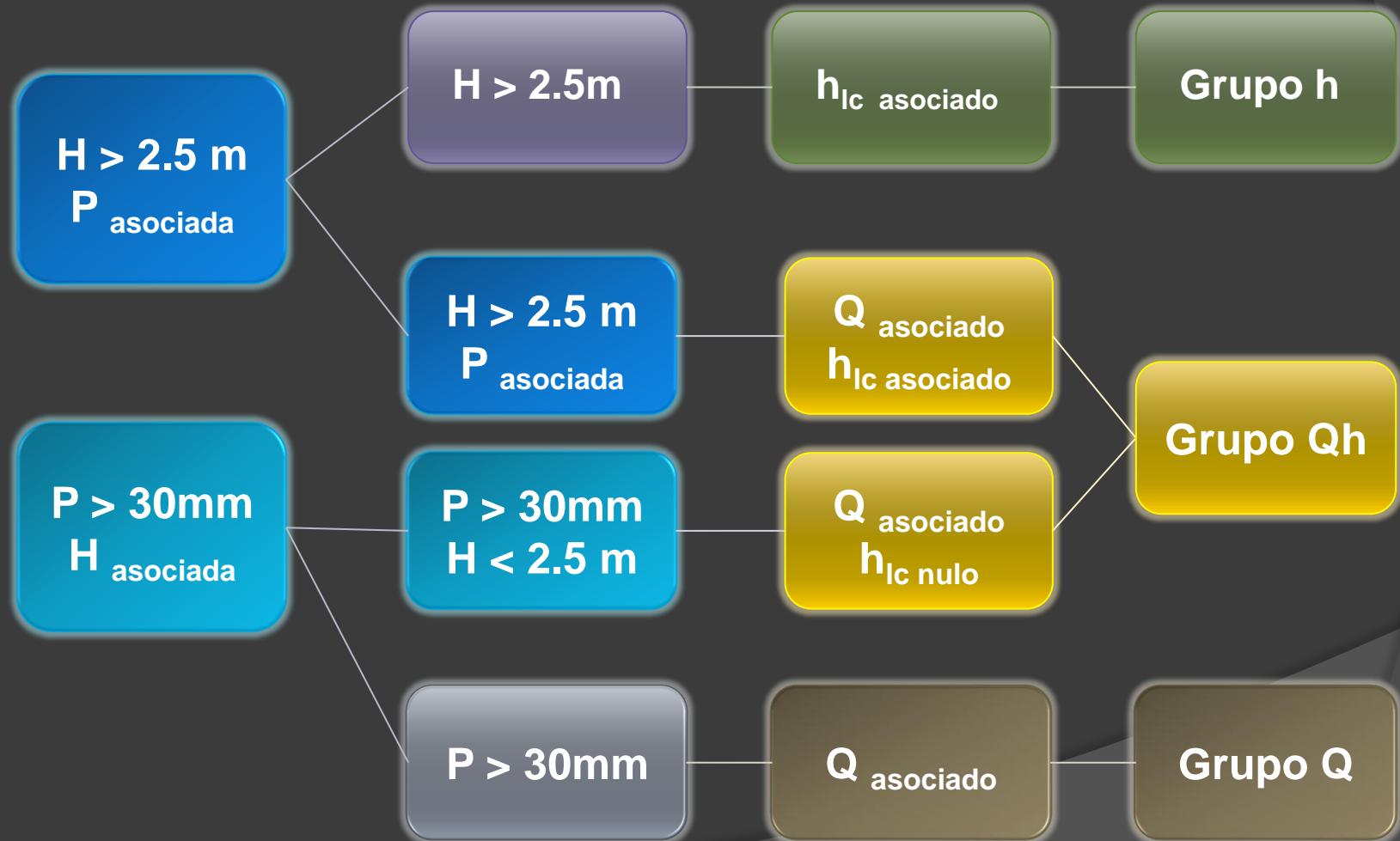
Métodos bivariados





COMBINACIÓN DE TEMPORALES MARINOS Y TORMENTAS TERRESTRES

SELECCIÓN DE TORMENTAS Y TEMPORALES

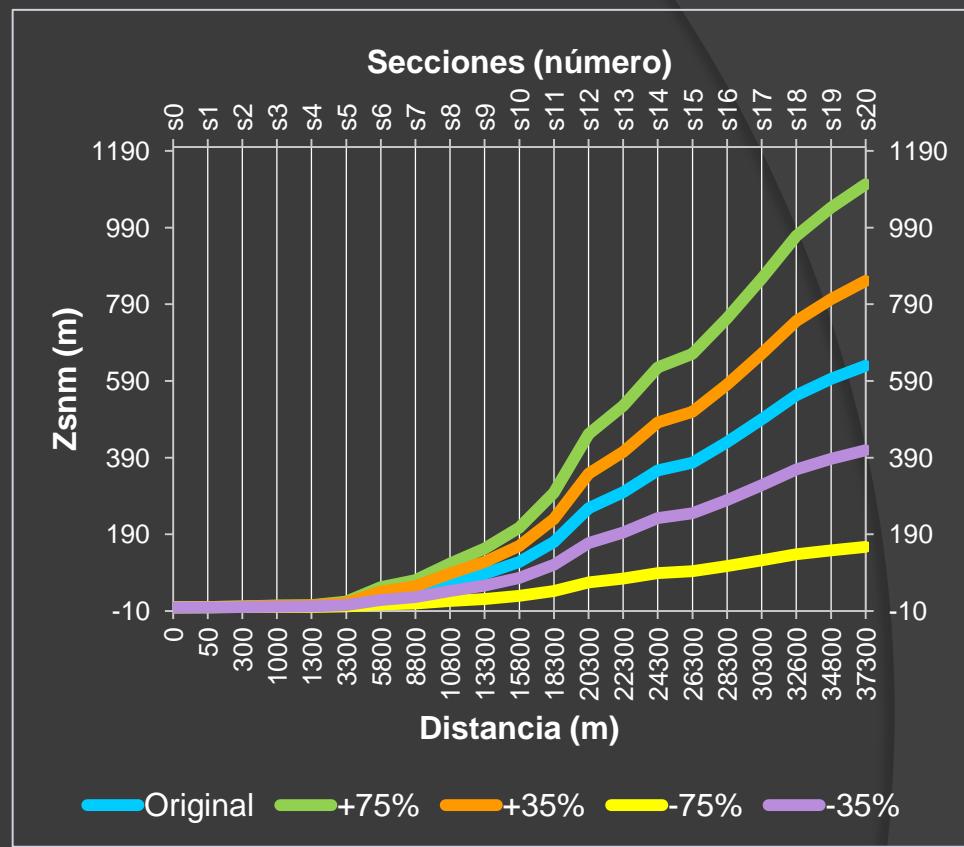
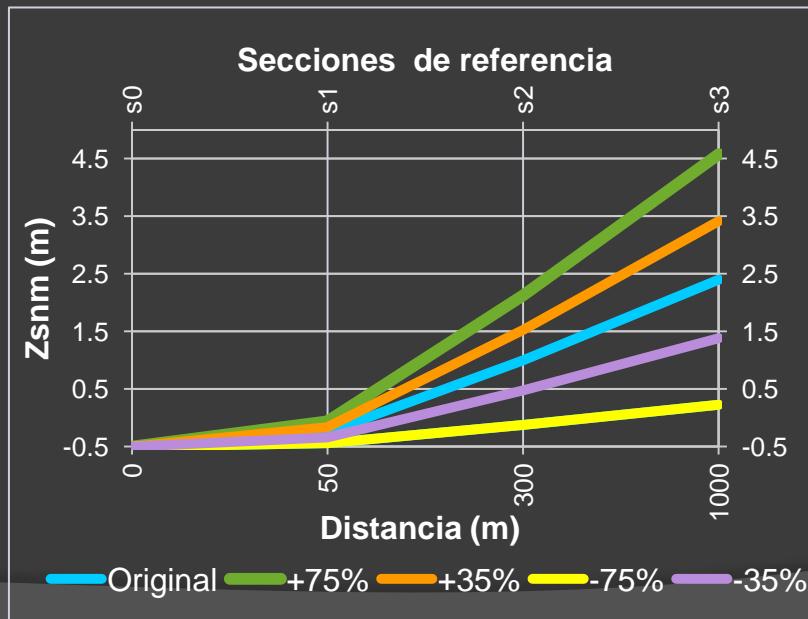


OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

OBTENCIÓN DE RESULTADOS MODELIZACIÓN EN HEC-RAS

Características

- 1 tramo - 21 secciones
- 3 zonas diferenciadas
- Pendientes $\pm 35\%$ y $\pm 75\%$

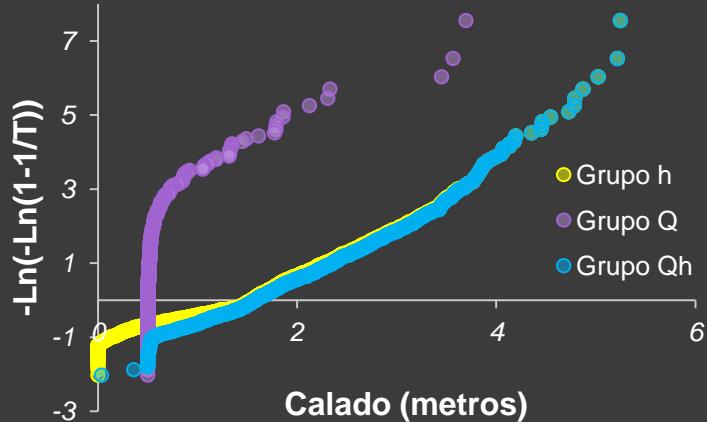


Casos y resultados

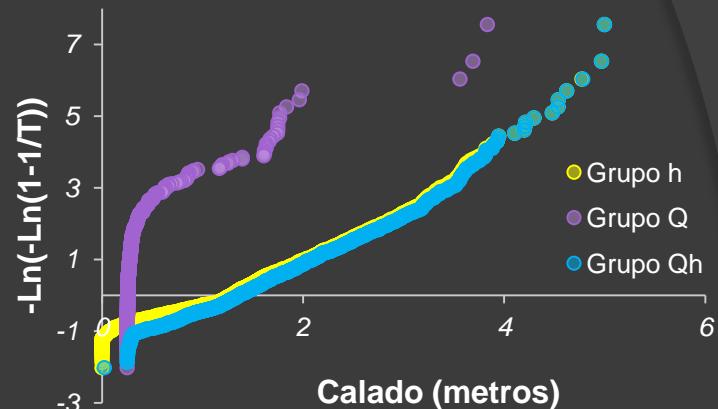
- Discretización de caudales - niveles
- Obtención de calados e inundaciones
- Interpolación para valores generados

OBTENCIÓN DE RESULTADOS. *CALADOS EN EL CENTRO DEL CAUCE ORIGINAL*

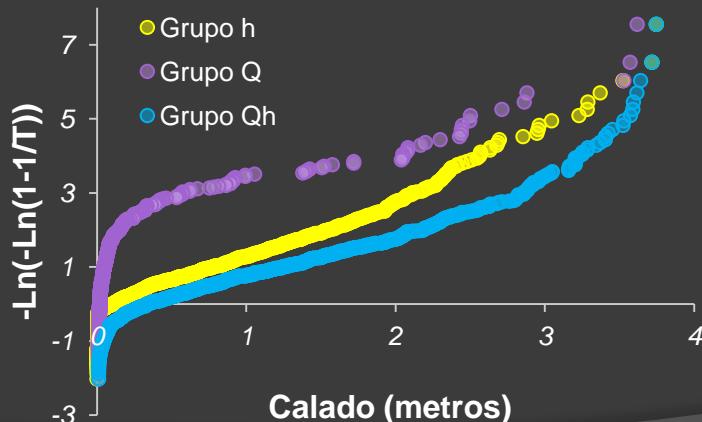
Sección 0 -Desembocadura



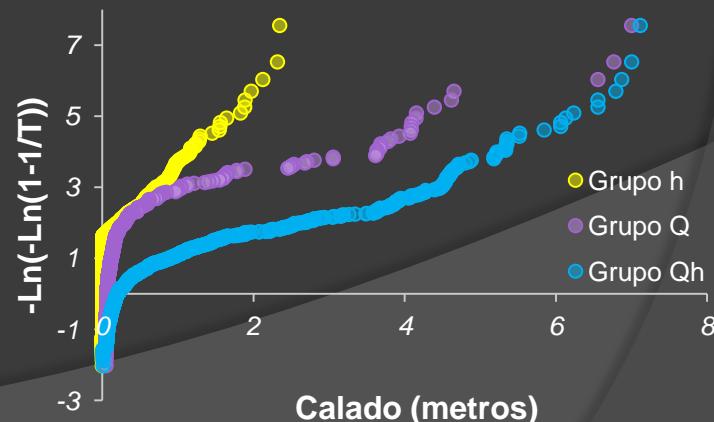
Sección 1 – 50 m.



Sección 2 – 300 m.

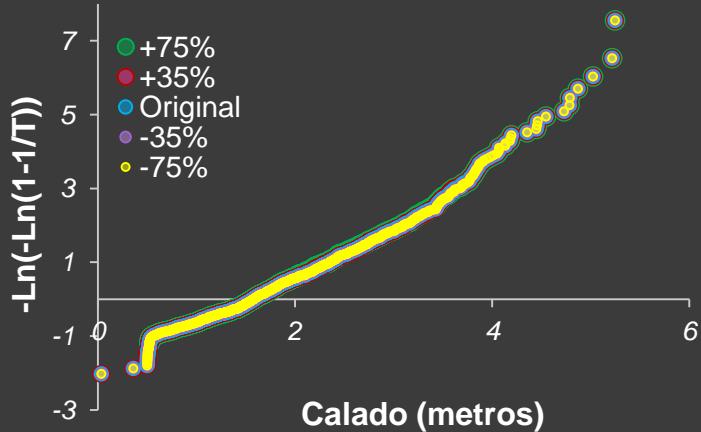


Sección 3 - 1000 m.

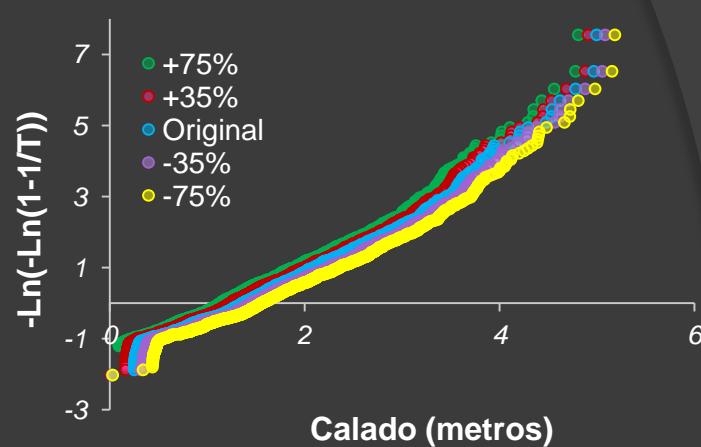


OBTENCIÓN DE RESULTADOS. *CENTRO DEL CAUCE – VARIACIÓN DE PENDIENTE.*

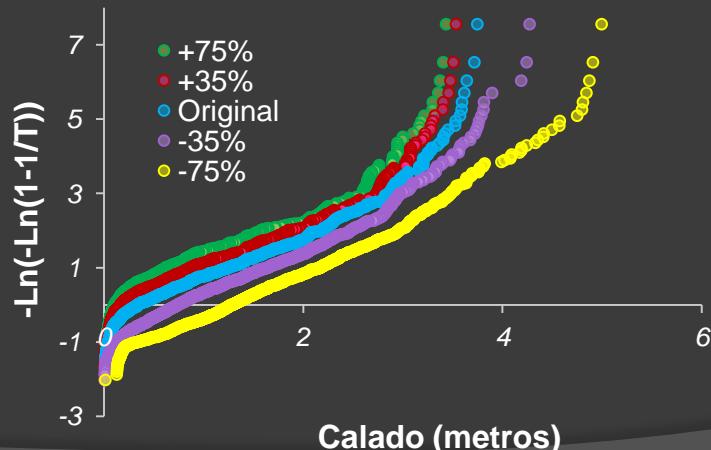
Sección 0 -Desembocadura



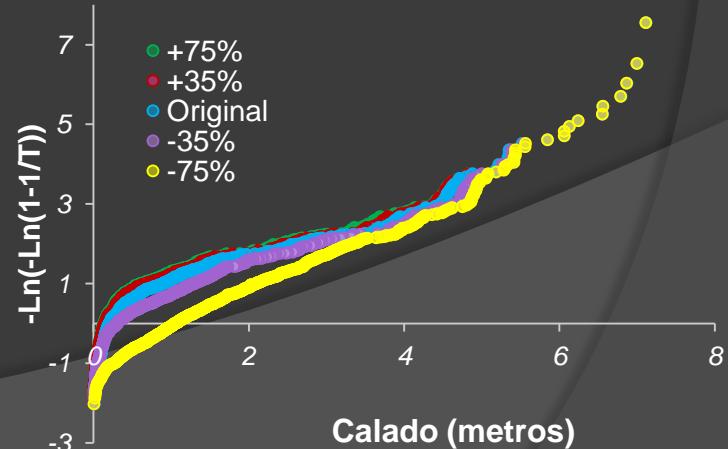
Sección 1 – 50 m.



Sección 2 – 300 m.

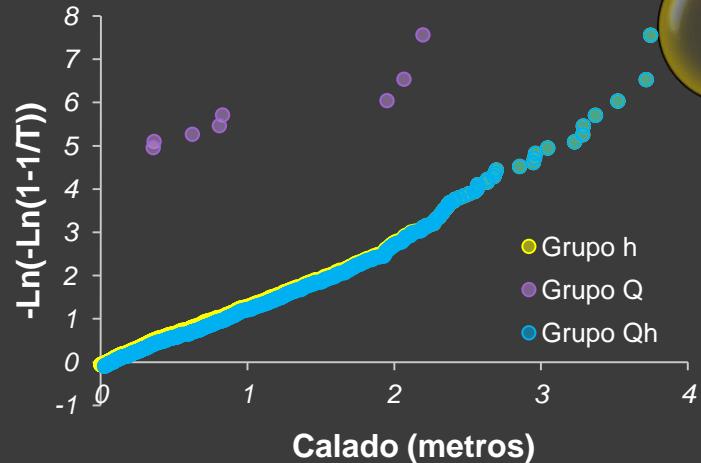


Sección 3 - 1000 m.



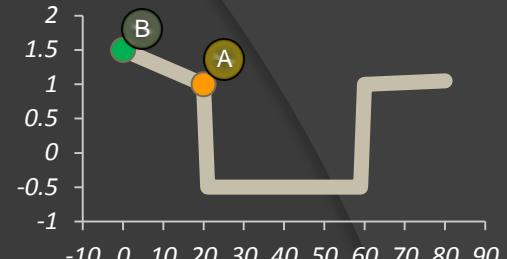
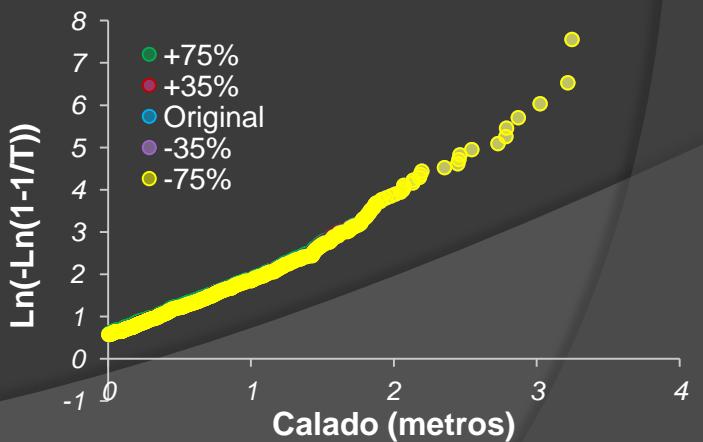
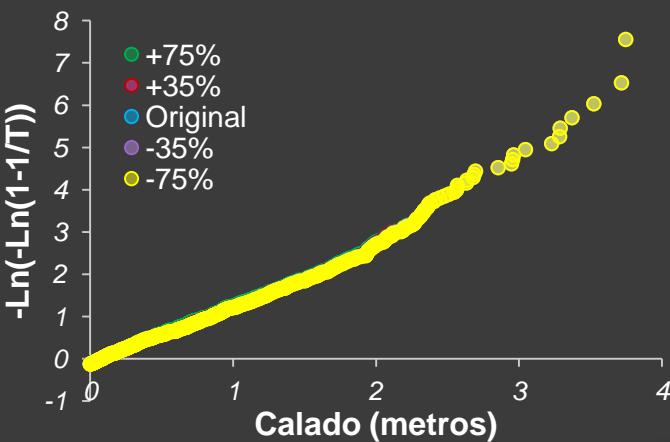
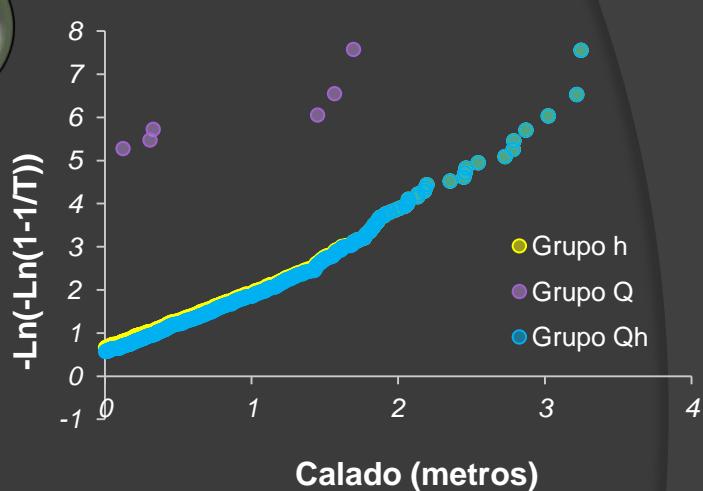
OBTENCIÓN DE RESULTADOS

LLANURA DE INUNDACIÓN. Sección 0 – Desembocadura.



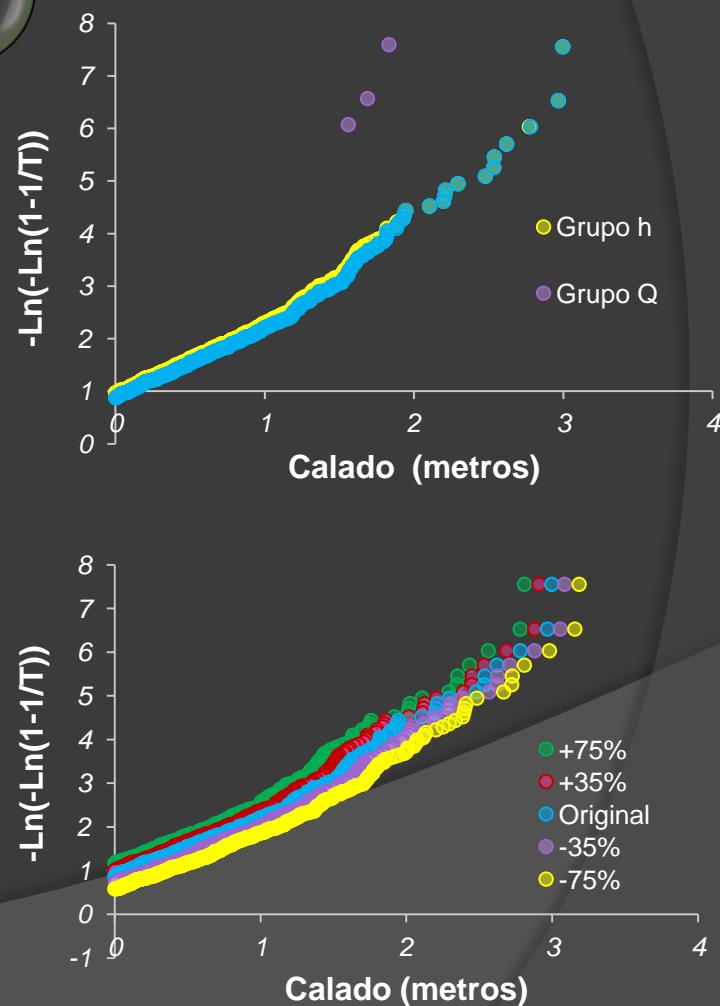
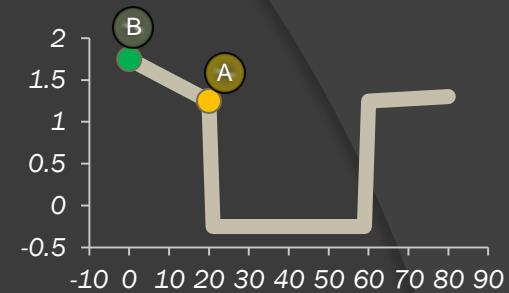
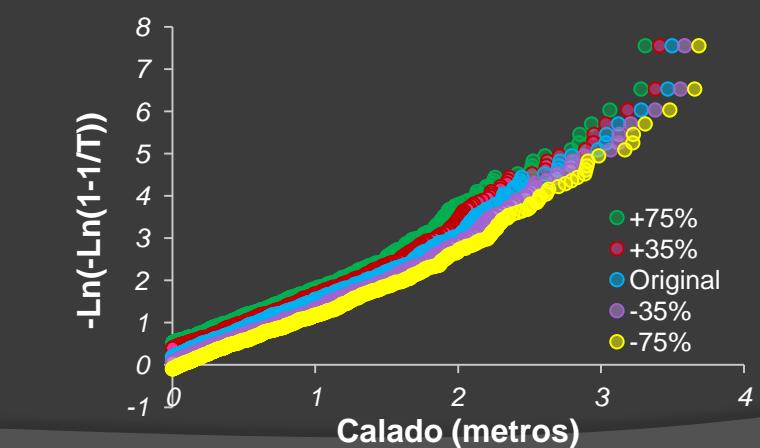
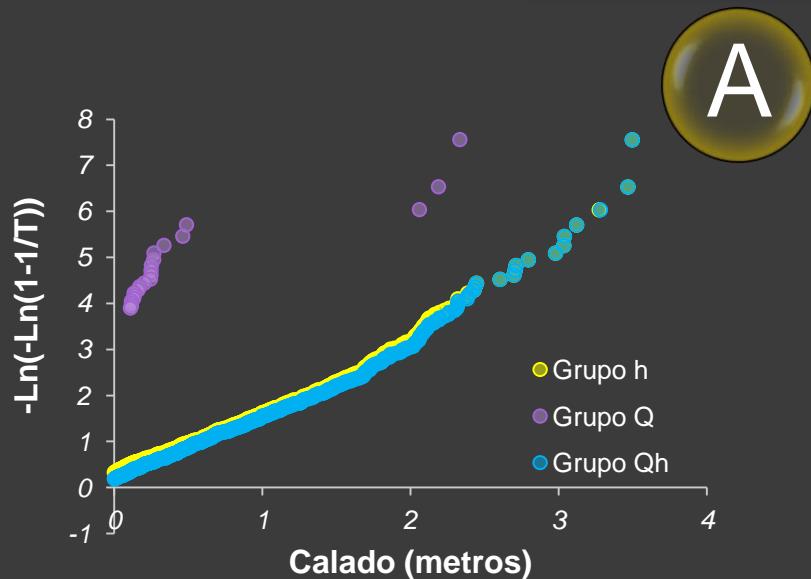
A

B



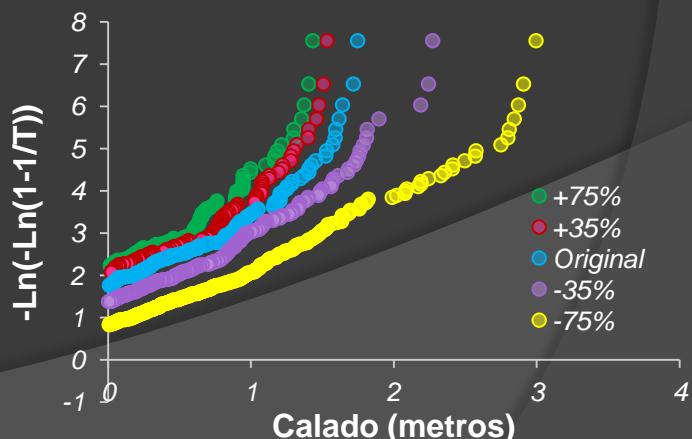
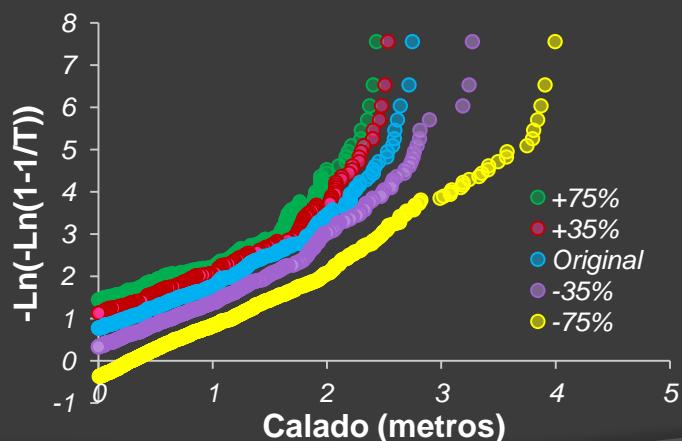
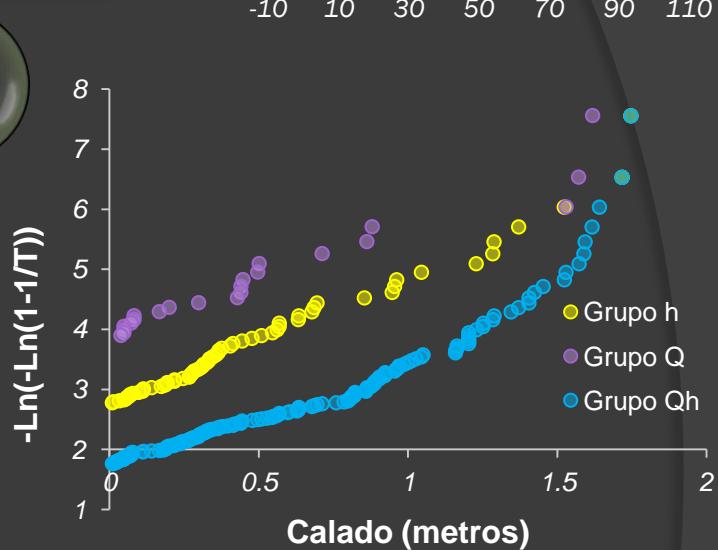
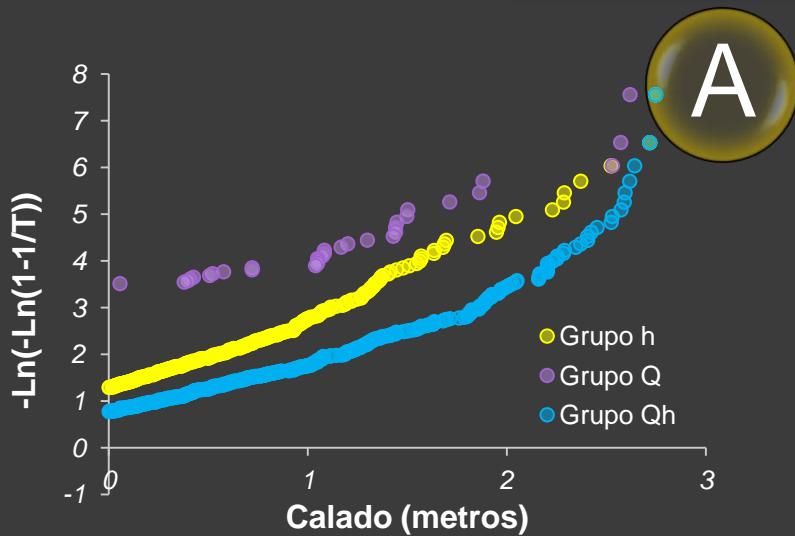
OBTENCIÓN DE RESULTADOS

LLANURA DE INUNDACIÓN. Sección 1 – 50 metros.



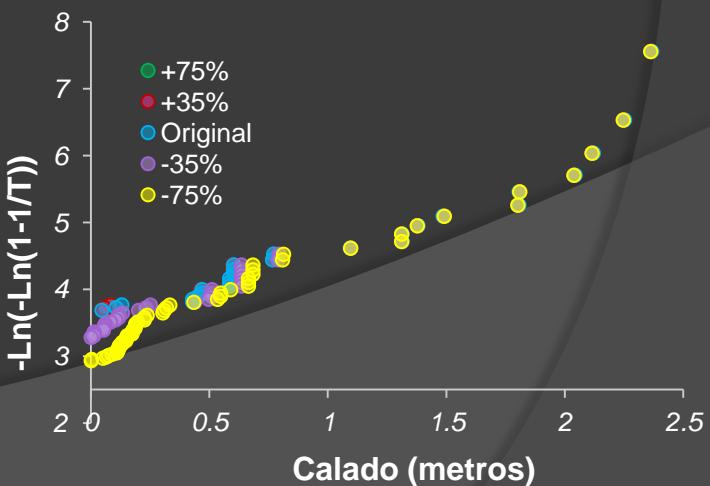
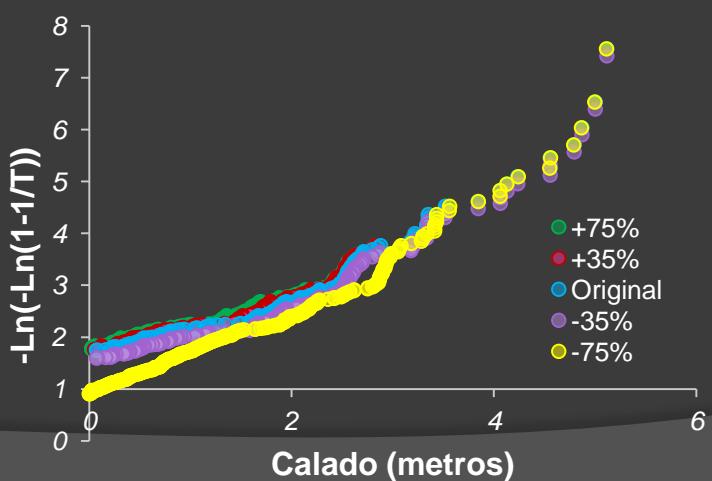
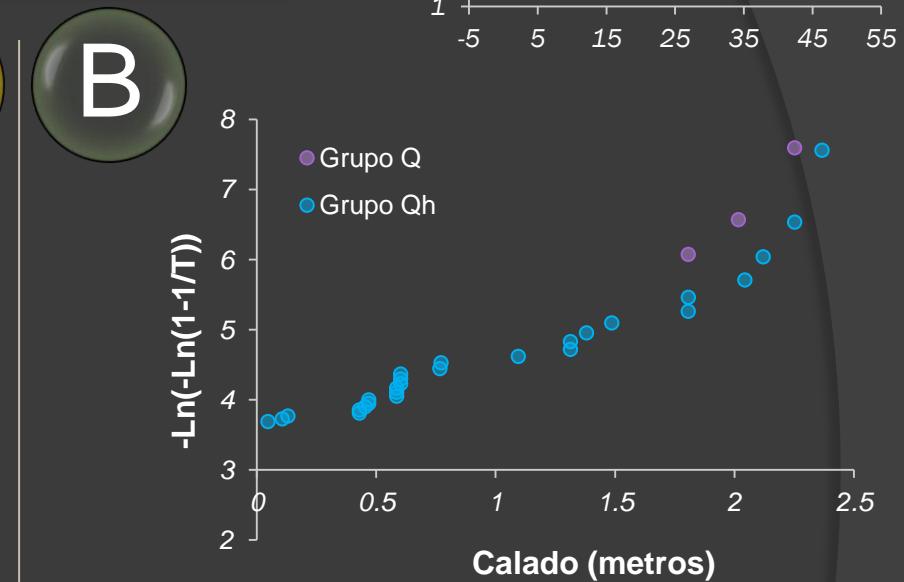
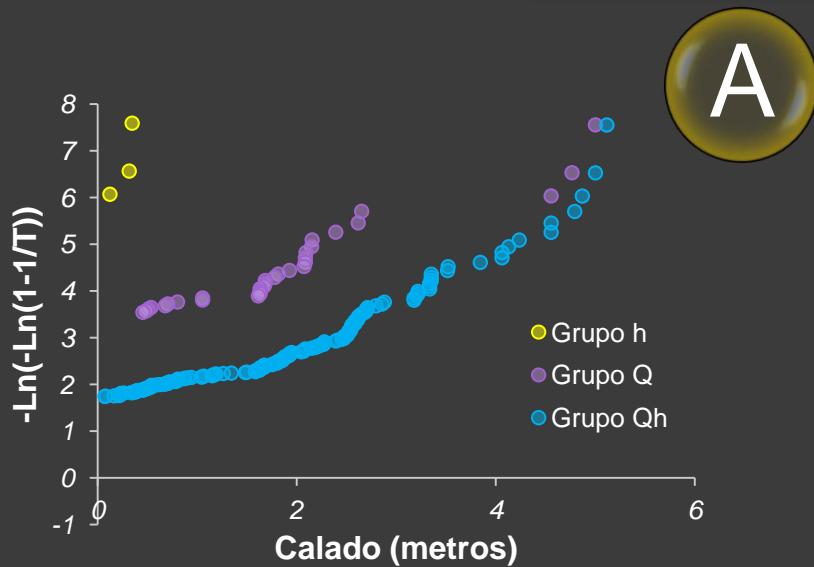
OBTENCIÓN DE RESULTADOS

LLANURA DE INUNDACIÓN. Sección 2 – 300 metros.



OBTENCIÓN DE RESULTADOS

LLANURA DE INUNDACIÓN. Sección 3 – 1000 metros.





OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

INUNDACIONES EN EL RÍO GIRONA

Desbordamientos del cauce (metros)

T (años)	Desembocadura			50 metros			300 metros			1000 metros		
	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh
5	0	1.16	1.23	0	0.91	0.98	0	0.16	0.70	0	0	0
10	0	1.73	1.76	0	1.47	1.54	0	0.72	1.30	0	0	1.43
25	0	2.26	2.26	0	2.01	2.05	0	1.26	1.90	0	0	2.55
50	0	2.52	2.52	0.11	2.27	2.31	1.04	1.52	2.20	1.62	0	3.21
100	0.28	2.93	2.93	0.25	2.68	2.68	1.44	1.93	2.42	2.08	0	3.80
500	0.65	3.28	3.28	0.36	3.03	3.03	1.74	2.28	2.59	2.43	0	4.56

Tormentas terrestres





OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

INUNDACIONES EN EL RÍO GIRONA

Desbordamientos del cauce (metros)

T (años)	Desembocadura			50 metros			300 metros			1000 metros		
	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh
5	0	1.16	1.23	0	0.91	0.98	0	0.16	0.70	0	0	0
10	0	1.73	1.76	0	1.47	1.54	0	0.72	1.30	0	0	1.43
25	0	2.26	2.26	0	2.01	2.05	0	1.26	1.90	0	0	2.55
50	0	2.52	2.52	0.11	2.27	2.31	1.04	1.52	2.20	1.62	0	3.21
100	0.28	2.93	2.93	0.25	2.68	2.68	1.44	1.93	2.42	2.08	0	3.80
500	0.65	3.28	3.28	0.36	3.03	3.03	1.74	2.28	2.59	2.43	0	4.56

Temporales marinos





OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

INUNDACIONES EN EL RÍO GIRONA

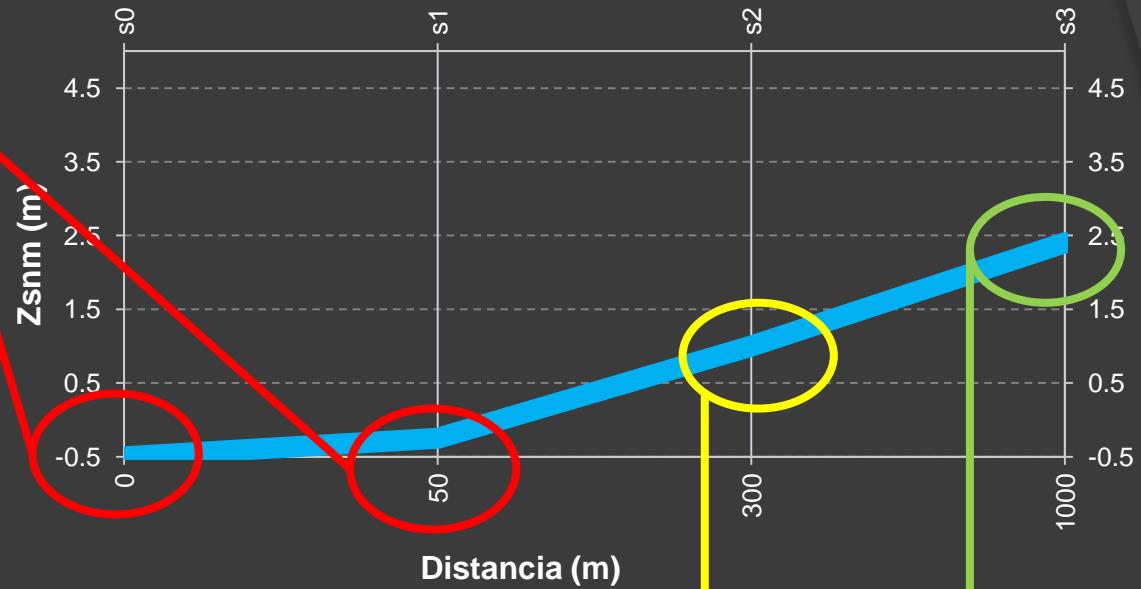
Desbordamientos del cauce (metros)

T (años)	Desembocadura			50 metros			300 metros			1000 metros		
	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh	Grupo Q	Grupo h	Grupo Qh
5	0	1.16	1.23	0	0.91	0.98	0	0.16	0.70	0	0	0
10	0	1.73	1.76	0	1.47	1.54	0	0.72	1.30	0	0	1.43
25	0	2.26	2.26	0	2.01	2.05	0	1.26	1.90	0	0	2.55
50	0	2.52	2.52	0.11	2.27	2.31	1.04	1.52	2.20	1.62	0	3.21
100	0.28	2.93	2.93	0.25	2.68	2.68	1.44	1.93	2.42	2.08	0	3.80
500	0.65	3.28	3.28	0.36	3.03	3.03	1.74	2.28	2.59	2.43	0	4.56

OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS – CENTRO DEL CAUCE

Calados controlados por temporales marinos



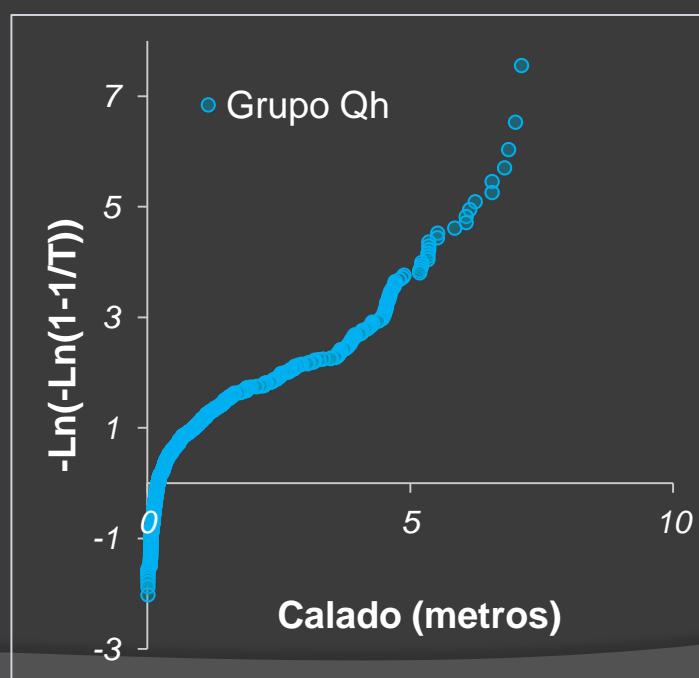
Aumenta influencia de tormentas terrestres
Disminuye influencia de temporales marinos

Comportamiento dado por tormentas terrestres
Efecto remanso

OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS – LLANURA DE INUNDACIÓN

- Comportamiento parecido al cauce para T elevados.
- Crecimiento relativo de calados con T inferior al del cauce.



Curvas de probabilidad en “S”

Más marcadas con la distancia

Secciones más encajadas

Valles más abiertos

OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS – VARIACIONES DE PENDIENTE

Desembocadura. Todos los casos aproximadamente iguales.

Sección 50 metros.

Mayores diferencias a mayor T por grandes tormentas.

Secciones 300 y 1000 metros.

→ Al aumentar la pendiente → cambios acusados.

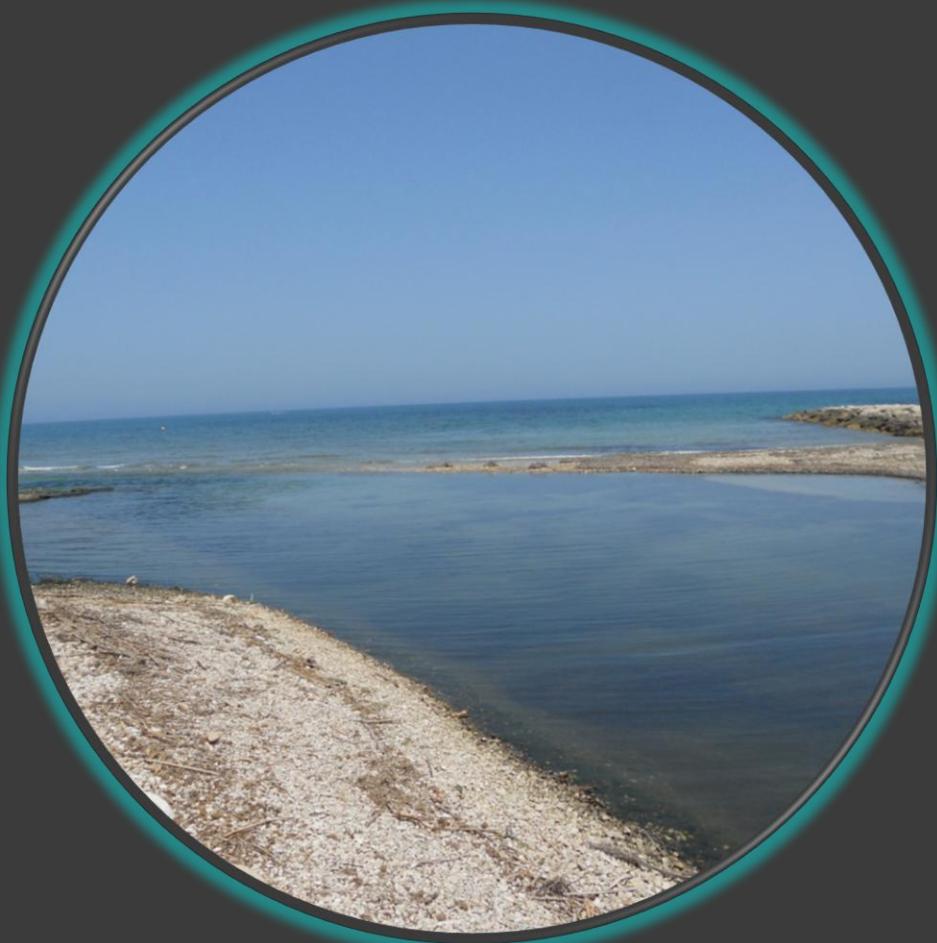
35% y 75% similares. Comportamiento de tormentas.

→ Al disminuir la pendiente → cambios graduales.

Mayor Influencia de los temporales marinos.



“En el Río Girona y con las características climáticas que lo acompañan, queda demostrada la necesidad de desarrollar la combinación de temporales marinos y tormentas terrestres para obtener una buena caracterización extremal de las inundaciones costeras existentes.”



*Estefanía Fernández Herrero
diciembre 2011*