

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE INUNDABILIDAD DE LA CIUDAD DE TORTOSA. CONSIDERACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE.

Josep Maria Franquet Bernis
Dr. Ingeniero Agrónomo, EUR-ING
Dr. Ciencias Económicas y Empresariales
Miembro de la “Societat Catalana d’Ordenació del Territori”
Académico de número de la Real Academia Europea de Doctores

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
Resumen / Resum / Summary	2
1. Objeto del estudio	3
2. Caracterización de la cuenca aportadora.....	5
2.1. Caracterización morfológica.....	5
2.2. Caracterización hidrológica.....	7
2.2.1. Condiciones antecedentes de humedad	7
2.2.2. Condiciones de flujo preferente fluvial	7
2.2.3. Características del suelo	8
2.2.4. Cubierta vegetal y usos del suelo	9
2.2.5. Análisis de la pendiente del terreno.....	9
2.2.6. Cálculo del número de curva	9
2.3. Estudio pluviométrico	9
2.4. Modelización hidrológica	13
2.5. Caudales de avenida	14
3. Estudio geomorfológico.....	18
4. Infraestructuras: puentes.....	19
5. Cálculo hidráulico	20
6. El número de Froude.....	21
7. Susceptibilidad a la dinámica torrencial	26
8. Aspectos técnicos a tener en cuenta	27
8.1. Evaluación del riesgo de inundación.....	27
8.2. Medidas de mitigación de inundaciones.....	28
8.3. Diseño y construcción resilientes	28
8.4. Planes de emergencia y gestión del riesgo	28
9. Discusión y Conclusiones	29
 Relación de figuras / Relación de tablas.....	31
Bibliografía y fondos documentales	32
Abreviaturas y siglas	34

Tortosa, julio de 2024.

RESUMEN

El presente trabajo trata de determinar, en primer lugar, los caudales de avenida representativos en la zona de estudio con motivo del emplazamiento del futuro hospital universitario de las *Terres de l'Ebre* en la ciudad de Tortosa (Tarragona). También se realiza el análisis de otros parámetros hidráulicos relevantes, como singularmente el número de Froude, lo que permitirá determinar la peligrosidad o idoneidad correctiva de dicho emplazamiento. Los valores obtenidos de dicho parámetro, para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, teniendo en cuenta la influencia de los embalses, resultan de escasa cuantía y corresponden a un flujo lento o subcrítico, en el que prevalece claramente la energía potencial sobre la cinética. Son compatibles con un régimen hidráulico típico de llanura, como era esperable desde el punto de vista geomorfológico, lo que pone de manifiesto, en su conjunto, la escasa peligrosidad del tipo de inundabilidad analizado.

Palabras clave: caudal, avenida, recurrencia, inundabilidad, energía, flujo, geomorfología, infraestructura, hidrología, cuenca, hidrograma.

RESUM

Aquest treball intenta determinar, en primer lloc, els cabals d'avinguda representatius a la zona d'estudi amb motiu de l'emplaçament del futur hospital universitari de les Terres de l'Ebre, a la ciutat de Tortosa (Tarragona). També es fa l'anàlisi d'altres paràmetres hidràulics rellevants, com ara singularment el número de Froude, cosa que permetrà determinar la perillositat o idoneïtat correctiva d'aquell emplaçament. Els valors obtinguts del paràmetre esmentat, per als períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys, tot tenint en compte la influència dels embassaments, resulten de poca quantia i corresponen a un flux lent o subcrític, en què preval clarament l'energia potencial sobre la cinètica. Són compatibles amb un règim hidràulic típic de plana, com era esperable des del punt de vista geomorfològic, la qual cosa evidencia, en el seu conjunt, l'escassa perillositat del tipus d'inundabilitat analitzat.

Paraules clau: cabal, avinguda, recurrència, inundabilitat, energia, flux, geomorfologia, infraestructura, hidrologia, conca, hidrograma.

SUMMARY / ABSTRACT

The present work attempts to determine, firstly, the representative flood flows in the study area due to the location of the future *Terres de l'Ebre (Lands of the Ebro river)* university hospital in the city of Tortosa (Tarragona). The analysis of other relevant hydraulic parameters is also carried out, such as the Froude's number, which will allow determining the danger or corrective suitability of said location. The values obtained for said parameter, for the return periods of 50, 100 and 500 years, taking into account the influence of the reservoirs, are small and correspond to a slow or subcritical flow, in which potential energy clearly prevails about kinetics. They are compatible with a typical plain hydraulic regime, as expected from the geomorphological point of view, which shows, as a whole, the low danger of the type of flood risk analyzed.

Keywords: flow, flood, recurrence, flooding, energy, flow, geomorphology, infrastructure, hydrology, basin, hydrograph.

$T = 500$ años; $Q_{500} = 9.167 \text{ m}^3/\text{s}$
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua = 11,21 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 8,61 m.s.n.m.
 Altura de la línea de energía = 11,60 m.s.n.m.
 Pendiente de la línea de energía = 0,000471 (0,471‰).
 Velocidad media = 1,68 m/s
 Velocidad zona canal central = 3,37 m/s
 Sección mojada = 5.454,33 m².
 Ancho de la lámina de agua = 1.185,65 m.
 Número de Froude⁵ al canal, $F_r = 0,34$ (flujo lento o subcrítico)

Tabla 7. Resultados para una recurrencia de 500 años.

$T = 100$ años; $Q_{100} = 5.546 \text{ m}^3/\text{s}$
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua = 9,01 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 5,76 m.s.n.m.
 Altura de la línea de energía = 9,57 m.s.n.m.
 Pendiente de la línea de energía = 0,000715 (0,715‰).
 Velocidad media = 2,25 m/s
 Velocidad zona canal central = 3,52 m/s
 Sección mojada = 2.462,40 m².
 Ancho de la lámina de agua = 903,10 m.
 Número de Froude al canal, $F_r = 0,40$ (flujo lento o subcrítico)

Tabla 8. Resultados para una recurrencia de 100 años.

$T = 50$ años; $Q_{50} = 4.618 \text{ m}^3/\text{s}$
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua = 8,19 m.s.n.m.
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 5,23 m.s.n.m.
 Altura de la línea de energía = 8,78 m.s.n.m.
 Pendiente de la línea de energía = 0,000821 (0,821‰).
 Velocidad media = 2,59 m/s
 Velocidad zona canal central = 3,50 m/s
 Sección mojada = 1.784,59 m².
 Ancho de la lámina de agua = 740,43 m.
 Número de Froude al canal, $F_r = 0,42$ (flujo lento o subcrítico)

Tabla 9. Resultados para una recurrencia de 50 años.

⁵ El número de Froude es, sin duda alguna, el principio más fundamental de la hidráulica de los canales abiertos y ofrece una idea acerca de la mayor o menor rapidez de una corriente comparada con su calado. Se trata de una magnitud numérica adimensional que expresa la relación existente entre las fuerzas de inercia y las de gravedad: se define como la razón entre la velocidad media del flujo uniforme (Manning o Chèzy) y la celeridad relativa de perturbaciones superficiales pequeñas (la celeridad de Lagrange), con lo que se obtiene un parámetro que, cuanto mayor es, indica una más acusada preponderancia de la energía cinética sobre la energía potencial de la corriente y, en su consecuencia, una mayor peligrosidad.

8.2. Medidas de mitigación de inundaciones

- **Muros de contención:** Construir, en caso de ser necesarios, muros de contención impermeables y resistentes alrededor del perímetro del hospital proyectado para evitar la entrada del agua de inundación.
- **Elevación del terreno:** Elevar el nivel del terreno del hospital si es preciso, mediante la aportación de material, creando un terraplén o pedraplén que proteja la estructura de las inundaciones.
- **Sistemas de drenaje:** Implementar sistemas de drenaje eficientes para evacuar rápidamente el agua de lluvia y las aguas pluviales del solar del hospital y sus inmediaciones.
- **Válvulas de retención:** Instalar válvulas de retención o unidireccionales en las tuberías de alcantarillado y desagüe para evitar el reflujo de aguas residuales contaminadas, durante un episodio de inundación.

8.3. Diseño y construcción resilientes

- **Materiales resistentes a la inundación:** Utilizar materiales de construcción más resistentes al agua y a la humedad, como hormigón armado, acero inoxidable y mampostería impermeable.
- **Protección de equipos críticos:** Ubicar los equipos eléctricos, electrónicos, mecánicos y de tecnología de la información en niveles elevados o en áreas selladas para protegerlos de daños producidos por agua.
- **Sistemas de respaldo de energía:** Implementar sistemas de respaldo de energía redundantes, como generadores diésel, para garantizar el suministro eléctrico en caso de cortes de energía durante una inundación.
- **Acceso y evacuación:** Diseñar planes de acceso y evacuación seguros y accesibles para pacientes, personal y visitantes en caso de una inundación, considerando rutas alternativas y zonas de refugio elevadas.

8.4. Planes de emergencia y gestión del riesgo

- **Plan de emergencia contra inundaciones:** Desarrollar un plan de emergencia integral que detalle los procedimientos a seguir antes, durante y después de una inundación, incluyendo protocolos de comunicación, alerta temprana, evacuación, respuesta a emergencias y recuperación.
- **Capacitación y simulacros:** Capacitar regularmente al personal del hospital en la implementación del plan de emergencia contra inundaciones y realizar simulacros periódicos para garantizar una respuesta efectiva en caso de producirse un evento real.

- **Monitoreo y alerta temprana:** Implementar sistemas de monitoreo hidrológico y meteorológico para detectar y alertar tempranamente sobre posibles amenazas de inundación, permitiendo la activación oportuna del plan de emergencia.
- **Gestión del riesgo a largo plazo:** Considerar el cambio climático y sus potenciales impactos en el riesgo de inundaciones para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación a largo plazo.

9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1ª) En el presente estudio se han marcado las hipótesis de cálculo hidrológico de la zona de estudio y se han obtenido los caudales de avenida representativos para los diferentes periodos de retorno o recurrencia (2'33, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1.000 años), siempre aplicando el principio de prudencia. En este sentido, cabe resaltar que se han tomado en consideración, por ejemplo, unos valores de las precipitaciones máximas esperables diarias superiores a las que se deducen de nuestros propios trabajos (ver anterior epígrafe 2.3.). Por otra parte, si se comparan con los datos de las aportaciones del Segre-Cinca, añadiendo las aportaciones del embalse de Mequinenza, se verifican los resultados.

2ª) Con la modelización y formulación efectuadas, se han obtenido unos resultados del número de Froude, para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, teniendo en cuenta la influencia de los embalses, que se hallan comprendidos entre los valores 0,34 y 0,42, correspondientes a un flujo lento, subcrítico o tranquilo, prevaleciendo claramente la energía potencial sobre la cinética. Corresponden a un régimen de llanura, como era esperable desde el punto de vista geomorfológico, **lo que pone de manifiesto la escasa peligrosidad del tipo de inundabilidad que podría afectar, en su caso, a la zona de estudio donde se prevé la ubicación del expresado hospital universitario.**

3ª) Pese a las limitaciones contempladas por efecto de la inundabilidad de la zona de estudio, es posible contemplar ciertos desarrollos en las zonas en situación básica de urbanizadas, con arreglo a lo establecido en el artículo 9.ter del RDPH (Texto consolidado del R.D. 849/1986, de 11 de abril, publicada la última actualización en 12/09/2015), en las que con arreglo al artículo 21 (“Situaciones básicas del suelo”) del texto refundido de la ley estatal del suelo y rehabilitación urbana (Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, publicado en el BOE de 31/10/2015), a fecha de 30 de diciembre de 2016, resulta de aplicación un régimen específico o especial, determinado en el artículo 9.ter del RDPH, que permite efectuar desarrollos en las mismas, si bien sujetos a ciertas limitaciones.

4ª) No obstante, tal como señala acertadamente la “Propuesta de Informe Urbanístico” de la CHE, de fecha 2/07/2024, dado que pueden existir circunstancias que condicionen los nuevos desarrollos urbanísticos del municipio de Tortosa, deberán ser las administraciones competentes en materias de territorio

y urbanismo (*Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya*) las que certifiquen la existencia de estos condicionantes y, en su caso, ponderen, contando con el informe de protección civil **(que, entre otras cuestiones de su competencia, debería poner de manifiesto la baja peligrosidad que se deduce del resultado obtenido, en el presente estudio hidrológico, del número de Froude)**, la prevalencia de dichos condicionantes sobre el riesgo de inundabilidad que aquí se ha analizado. De este modo, deberán ser estas administraciones las que determinen, con arreglo al procedimiento establecido en el RDPH, la aplicabilidad del régimen especial establecido en el artículo 9 quater del citado Reglamento.

5ª) Procede, por parte del Ayuntamiento de Tortosa, iniciar los trámites administrativos y técnicos para llevar a efecto la pertinente modificación puntual del Plan de Ordenación Urbanística Municipal (2007) de los terrenos donde se pretende la construcción del nuevo hospital, en el Plan Parcial denominado “Camí de Roquetes”, lo que permitirá la recalificación de dichos terrenos como equipamiento sanitario (servicio de interés público y social, SIPS).

6ª) La zona de estudio además es una área céntrica y nuclear entre los municipios contiguos de Tortosa-Jesús y Roquetes, prácticamente sin solución de continuidad. Resulta de fácil accesibilidad peatonal y vehicular, y próxima a infraestructuras viarias (C-12 “Eix de l’Ebre”), otros servicios sanitarios, de seguridad (parque de bomberos) y comerciales.

7ª) En el presente estudio de inundabilidad local, no se han tenido en cuenta los fenómenos de cambio climático⁷, disminución de la pluviometría por el denominado “efecto invernadero”, aumento de usos consuntivos en la cuenca y la posible construcción o recrecimiento de más embalses que los ya existentes a lo largo y ancho de la cuenca hidrográfica del río Ebro, quedándonos claramente, en todo momento, del lado de la seguridad. Y obteniendo, en su consecuencia, unas avenidas de mayor valor absoluto que el real para cada periodo de retorno o recurrencia estudiado.

8ª) En cualquier caso, construir un hospital cerca de una zona inundable requiere una evaluación exhaustiva del riesgo como la que aquí se lleva a cabo, la implementación de medidas de mitigación integrales, un diseño y construcción

⁷ Al respecto, hay que tener en cuenta que, en 1974, dos científicos, el estadounidense Frank Rowland y el mexicano Mario Molina -ambos ganadores del premio Nobel de Química en 1995- descubrieron la disminución que se viene produciendo en la capa de ozono, principal responsable en evitar la penetración de la radiación solar en la superficie terrestre. Actualmente, la producción de los gases que provocan el llamado Efecto Invernadero (gases de invernadero, principalmente el dióxido de carbono) ha aumentado en relación a mediciones efectuadas en tiempos pasados. En nuestro caso, la Directiva de Inundaciones (Directiva 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) reconoce el cambio climático como uno de los factores que están contribuyendo a aumentar la probabilidad de ocurrencia de las inundaciones, así como su impacto negativo, y exige que esta influencia se tenga en consideración tanto en la realización de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) para la identificación de las zonas de mayor riesgo de la cuenca como en la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) y sus revisiones.

resilientes, la elaboración de planes de emergencia sólidos para garantizar la seguridad y la continuidad de la atención médica en caso de inundaciones, así como la gestión del riesgo a largo plazo.



RELACIÓN DE FIGURAS

- Fig. 1. Situación.
- Fig. 2. Emplazamiento solar (propuesta alternativa 2023).
- Fig. 3. Zonas de peligro de inundación fluvial (T500, T100, T10, flujo preferente).
- Fig. 4. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.
- Fig. 5. Áreas susceptibles de inundación.

RELACIÓN DE TABLAS

- Tabla 1. Condiciones antecedentes de humedad del S.C.S.
- Tabla 2. Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno.
- Tabla 3. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (con influencia de los embalses).
- Tabla 4. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (régimen natural).
- Tabla 5. Resumen de datos procedentes de la C.H.E.
- Tabla 6. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.
- Tabla 7. Resultados para una recurrencia de 500 años.
- Tabla 8. Resultados para una recurrencia de 100 años.
- Tabla 9. Resultados para una recurrencia de 50 años.