



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA DE ESTADO
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

Subdirección General de Regadíos,
Caminos Naturales e
Infraestructuras Rurales



FERAGUA

Asociación de Comunidades
de Regantes de Andalucía



JORNADA “BALSAS EN LOS REGADÍOS DEL MAPA: PRESENTE Y FUTURO”

TITULO PONENCIA: MODELIZACIÓN EN BALSAS
PONENTE D.FERNANDO ESPEJO ALMODÓVAR (UIC IGA-USAL)

SEVILLA

25 de Septiembre de 2025



1. AYER

- Criterios de seguridad
- Roturas de balsas. Metodología

2. HOY

- Nuevos desafíos
- La IA y el Machine Learning



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

AYER

Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

SANTA CRUZ DE

TENERIFE

Medio millón para arreglar la balsa de La Caldereta, con 9.000 roturas

Se inauguró en 2015 y antes de un año tuvo que dejar de recibir agua al tener miles de parches o agujeros en su lámina. Aguas ha aprobado el proyecto de impermeabilización.

V.M., Fuencaliente 20/abr/16 6:17 AM Edición impresa

c) Balsa: Obra hidráulica consistente en una estructura artificial destinada al almacenamiento de agua situada fuera de un cauce y delimitada, total o parcialmente, por un dique de retención. **RD 9/2008**

Diario de Sevilla

AGR ANDALUCÍA

Balsas y presas, como mezclar churras con merinas

LA OPINIÓN INVITADA

Balsas y presas, como mezclar churras con merinas

• El autor pide un cambio racional en las normas para que distingan entre unas y otras.

ANDRÉS DEL CAMPO
26 Abril, 2016 - 01:00h

Una avalancha de 12 millones de litros de agua al romperse una balsa sorprende a los vecinos de Chiva | Edición impresa | EL PAÍS

COMUNIDAD VALENCIANA

Una avalancha de 12 millones de litros de agua al romperse una balsa sorprende a los vecinos de Chiva

BEGOÑA NAVARRO
Chiva - 30 ENE 2003

Viernes 25 de abril de 2008 Contacta con levante-emv.com | RSS

levante-emv.com
El Mercantil Valenciano

NOTICIAS
Comarcas

HEMEROTECA »

PORTADA ACTUALIDAD DEPORTES OPINION/BLOGS ECONOMIA OCIO VIDA Y ESTILO

C.Valenciana Valencia Comarcas Castelló Sucesos España Internacional Cultura Sociedad Tecnología Gente Fallas

EN DIRECTO

El Congreso debate y vota el decreto para la reforma de la estiba

Levante-EMV.com » Comarcas

la vall d'albaida

Una balsa de Montitxelvo pierde 11.000 m3 de agua al día desde enero por una rotura

El retraso de la reparación puede perjudicar a la cosecha de verano



elEconomista.es

Fuerte descontrol en las balsas de riego

Tomás Díaz

22/04/2015 - 13:54

- En Murcia hay más de una balsa de riego por kilómetro cuadrado
- Las grandes balsas deberían disponer de planes de emergencia

La Administración apenas supervisa las balsas de riego; ni siquiera sabe cuántas hay y la aplicación de la normativa de seguridad brilla por su ausencia.

Provincia Cáceres

Cáceres Plasencia Trujillo Navalmoral Coria HOY Agro

Las calles de Valverde de la Vera se llenan de barro por la rotura en una balsa de agua



Imagen de la inundación que ha sorprendido a los vecinos de Valverde de la Vera

No se ha registrado ningún herido ni desaparecido

REDACCIÓN/EFE
Miércoles, 5 julio 2017, 10:23





¿LA SEGURIDAD DE LA Balsa ES TOTAL?

Si tu respuesta es dubitativa, ahí tienes la respuesta a...

¿Por Qué Simular un Desastre?

Más allá de la Prevención: La Necesidad de la Mitigación

Aunque el diseño de balsas busca la máxima seguridad, la posibilidad de rotura, aunque remota, nunca es cero. El análisis de rotura es un ejercicio de **responsabilidad y planificación normativa**.

- **Objetivo Principal:** Determinar las consecuencias de un fallo hipotético de la estructura para proteger a la población y los bienes situados aguas abajo.
- **Marco Normativo:** Es un requisito legal para la mayoría de las presas y balsas clasificadas según su riesgo potencial.
- **Resultado Final:** La base técnica para los **Planes de Emergencias**.

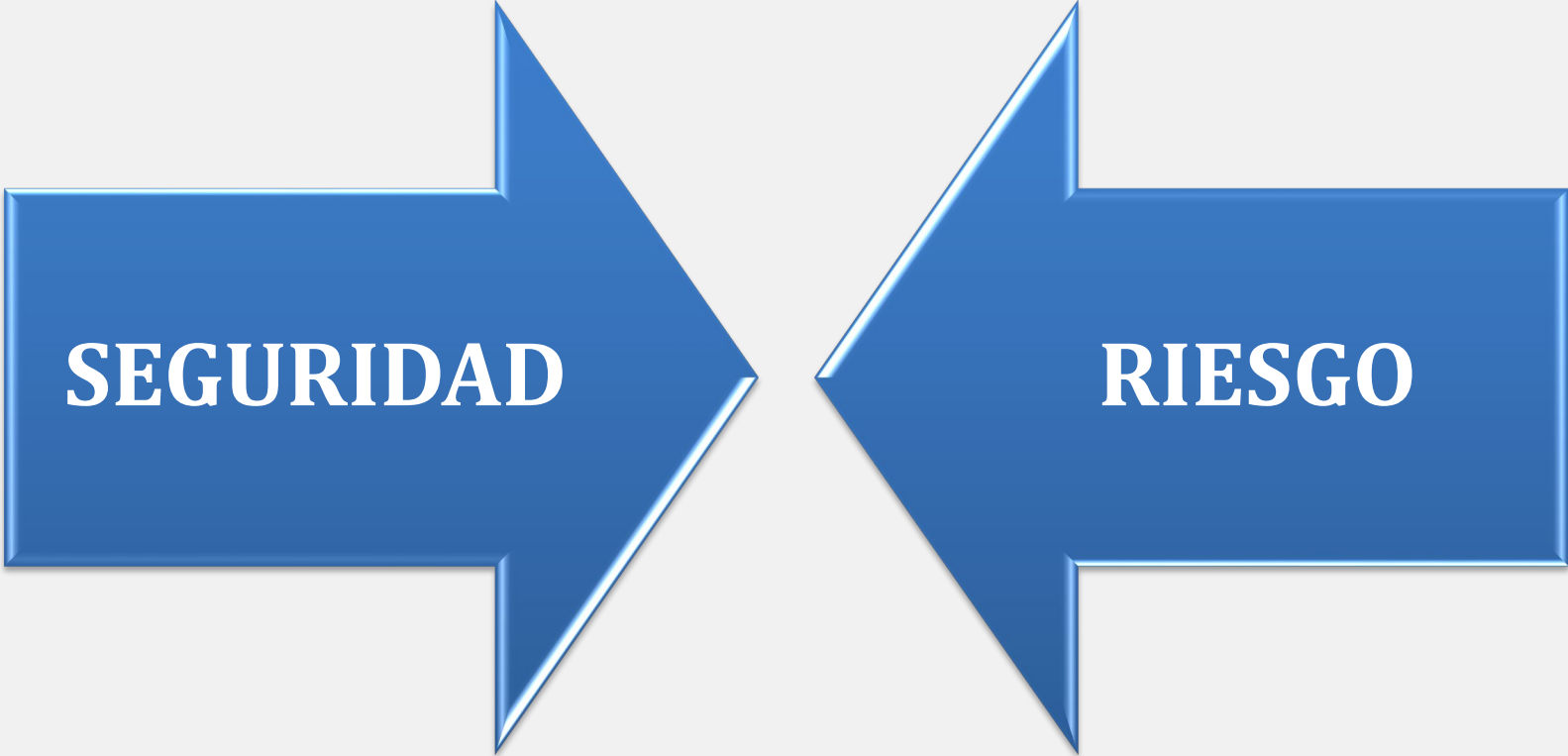


GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA



SEGURIDAD

RIESGO



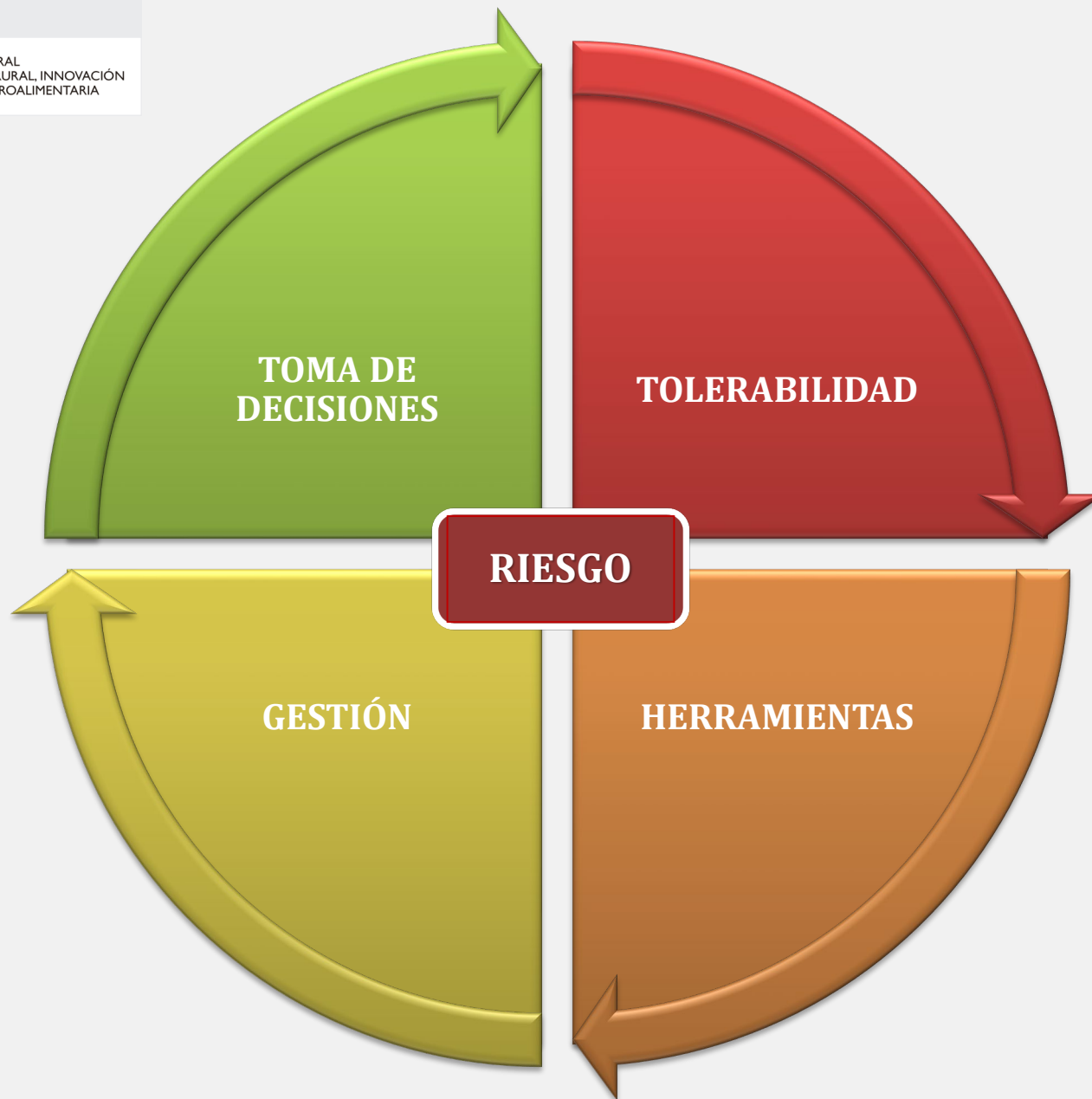


GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA



Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA



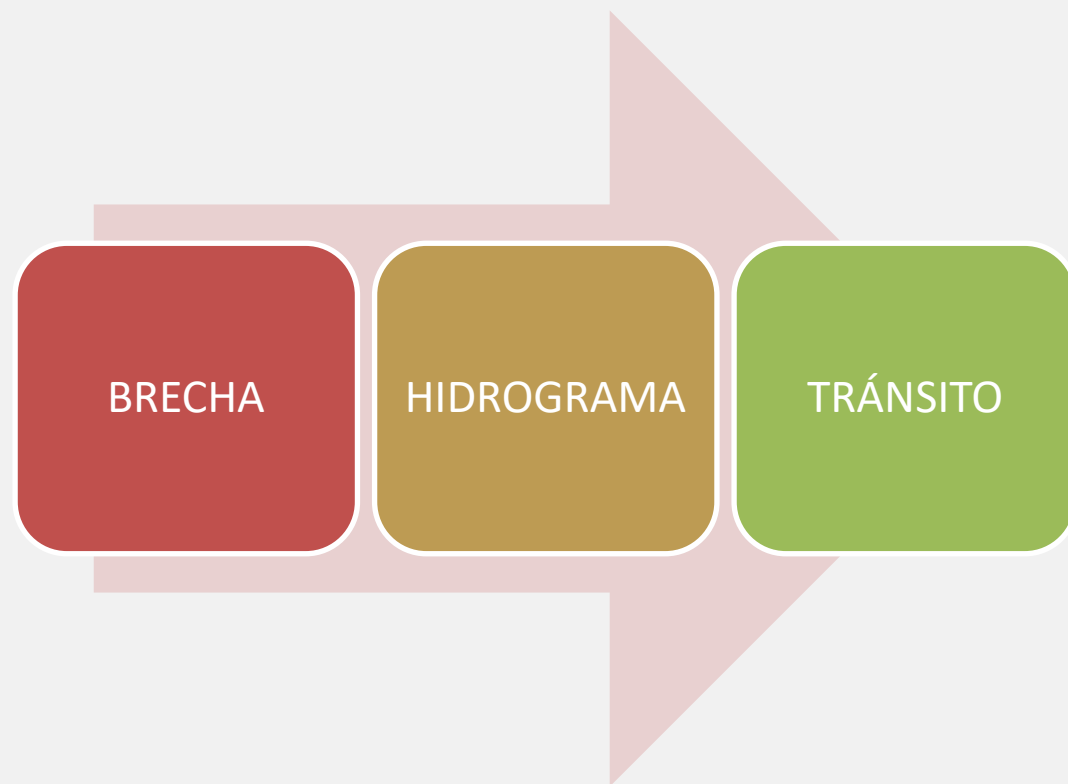
**MEJORAR LA
RESPUESTA DEL
SISTEMA AUMENTANDO
SU RESILIENCIA**

Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales

Un Proceso Secuencial en Tres Pasos Fundamentales

El estudio completo se descompone en tres modelos interconectados que nos llevan desde el fallo de la presa hasta el mapa de inundación.

- 1. Modelo de Formación de la Brecha:**
¿Cómo y a qué velocidad se rompe el dique?
- 2. Modelo Hidráulico de Vaciado:**
¿Cuánta agua sale y con qué caudal?
- 3. Modelo de Propagación de la Avenida:** ¿Hacia dónde va el agua y cómo se comporta?





El Origen de la Ola: Caracterizando el Fallo

El primer paso es definir cómo sería la rotura. Esto depende críticamente del material del dique.

- **Parámetros a Definir:**

- **Geometría Final de la Brecha:** Ancho superior, ancho inferior, taludes laterales.
- **Tiempo de Formación:** ¿Cuánto tarda en desarrollarse la brecha por completo? Puede ir de minutos (materiales sueltos) a ser casi instantáneo (hormigón).

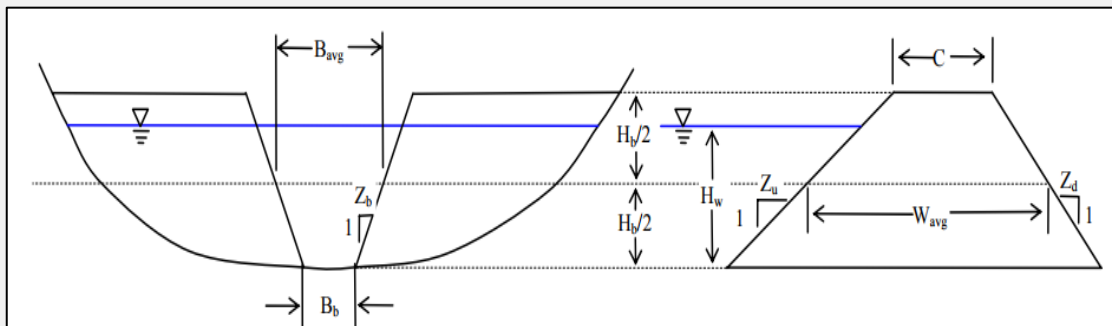


- **Parámetros a Definir:**
 - **Modo de Fallo:**
 - **Rotura por Sifonamiento (Piping):** Erosión interna progresiva. Típico en presas de tierra.
 - **Rotura por Deslizamiento:** Colapso de un talud.
 - **Rotura por Sobrevertido (Overtopping):** El agua pasa por encima de la coronación, erosionando el talud externo.
 - **Metodología:** Se usan **fórmulas empíricas** validadas (Froehlich, MacDonald & Langridge-Monopolis, etc.) que relacionan estos parámetros con las dimensiones de la presa y el volumen de agua embalsada.

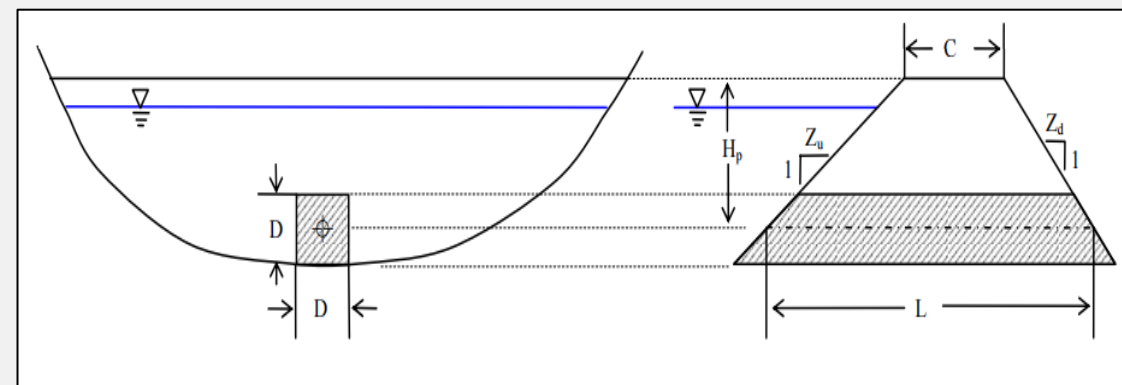


CARACTERIZACIÓN DE LA BRECHA (GEOMETRÍA)

Brecha completa



Brecha incompleta



“Guidelines for Dam Breach Analysis (Colorado State 2010)”



FÓRMULA EMPÍRICA DE FROEHLIC 1995

F95

ECUACIÓN	Froehlich 95a		63 casos
VARIABLE	RANGO		OBSERVACIONES
	Mín.	Máx.	
Altura (m)	3.66	92.96	90%<30. /76%<15
Volumen (hm³)	0.013	660.00	87%<25 / 76%<15

MODO DE FALLO	Sobrevertido	Sifonamiento u otros
TALUDES H/V		
Horizontal	1.4	0.9
Vertical	1.0	1.0

(McCook, 2004)

$$B_{ave} = 0.1803K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19}$$

$$t_f = 0.00254V_w^{0.53} h_b^{-0.90}$$

(Froehlich, 1995a; Froehlich, 1995b)



Una vez definida la brecha, se modeliza cómo el agua de la balsa sale a través de ella. El resultado es el **hidrograma de rotura**.

- **¿Qué es un Hidrograma de Rotura?** Es un gráfico que muestra la evolución del caudal (m^3/s) que sale por la brecha a lo largo del tiempo.
- **Puntos Clave del Hidrograma:**
 - **Caudal Pico (Q_p):** El máximo caudal instantáneo liberado. Es el dato más importante para el análisis posterior.
 - **Tiempo al Pico (t_p):** Cuánto tarda en alcanzarse ese caudal máximo.
 - **Volumen Total Vaciado:** La cantidad total de agua liberada.
- **Modelo Matemático:** Se simula el vaciado del embalse aplicando ecuaciones de vertedero sobre la brecha en evolución.



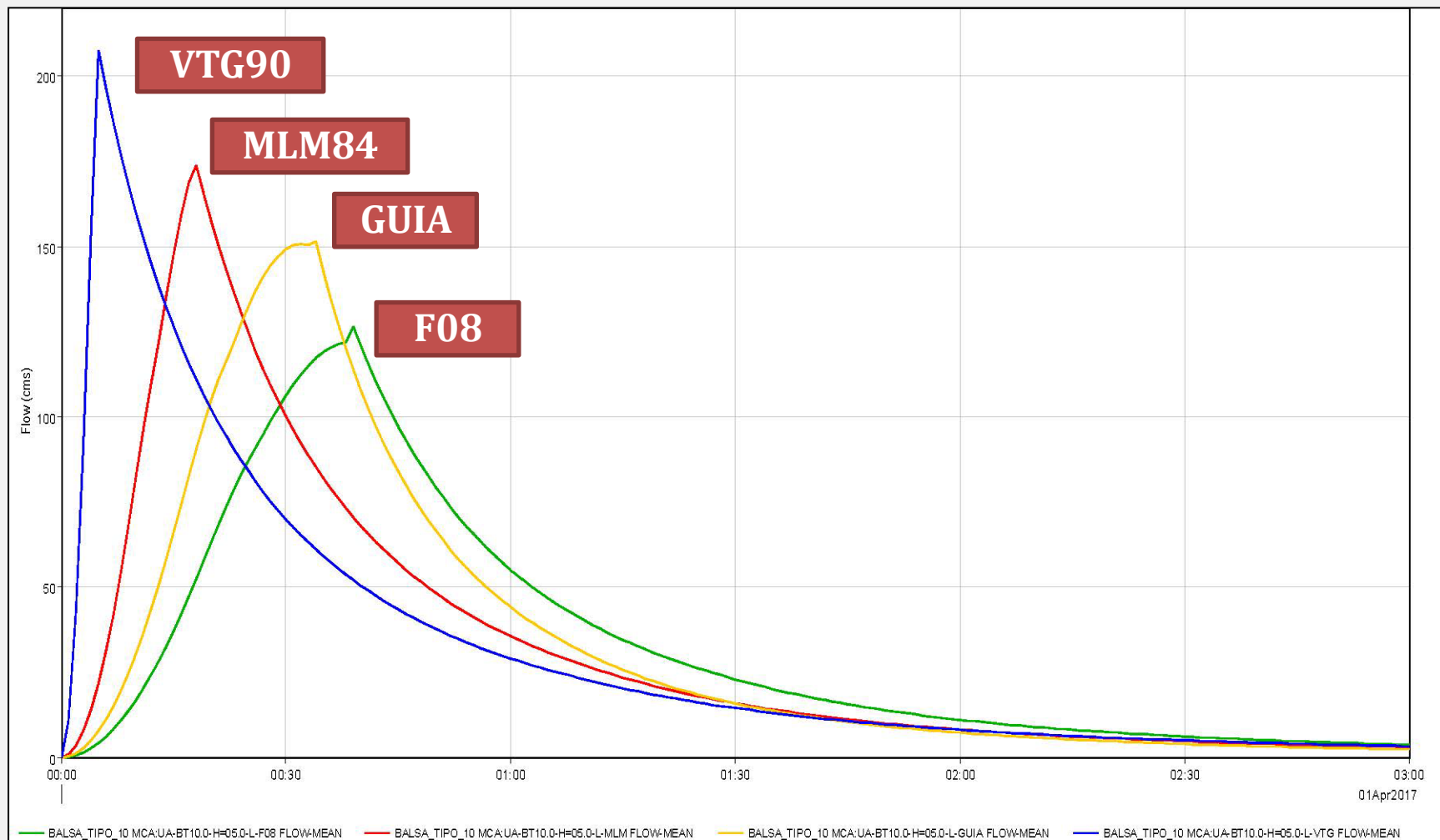
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

COMPARATIVO DE HIDROGRAMAS vs FÓRMULAS EMPÍRICAS



Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales



Tránsito del hidrograma

Esta es la realidad que se pretende simular, el análisis dinámico de la onda de avenida. El hidrograma de rotura se introduce como condición de entrada en un modelo hidráulico que simula el flujo del agua sobre la topografía real aguas abajo.

- **Base Cartográfica:** Se necesita un **Modelo Digital del Terreno (MDT)** de alta resolución.
- **Modelo Matemático:** Se utilizan modelos bidimensionales (2D) que resuelven las **Ecuaciones de Saint-Venant** (o ecuaciones de aguas someras). Estas ecuaciones conservan la masa y el momento del flujo.
- **Software Común:** HEC-RAS 2D, IBER, FLO-2D.



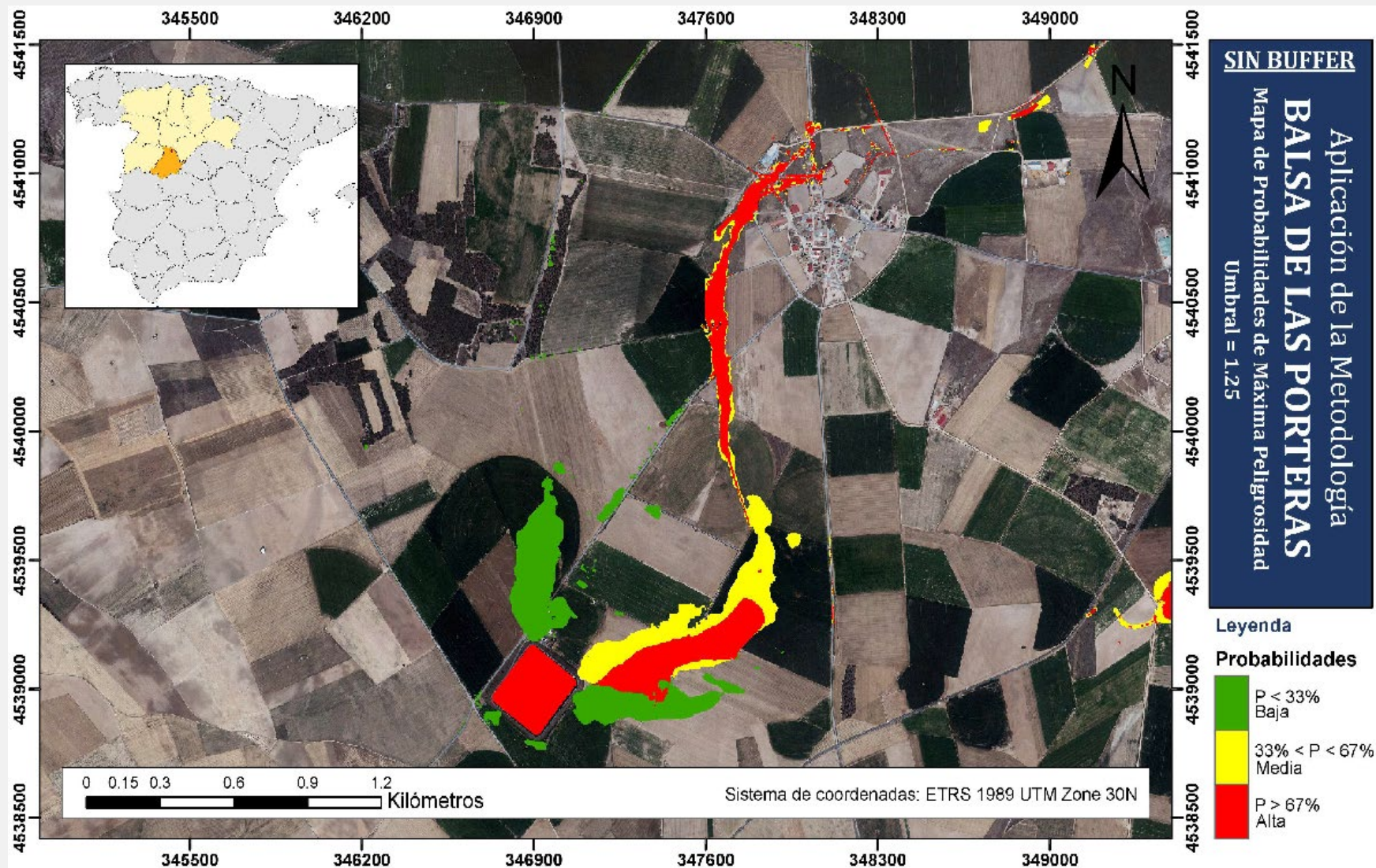
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE LA PROPAGACIÓN



Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales



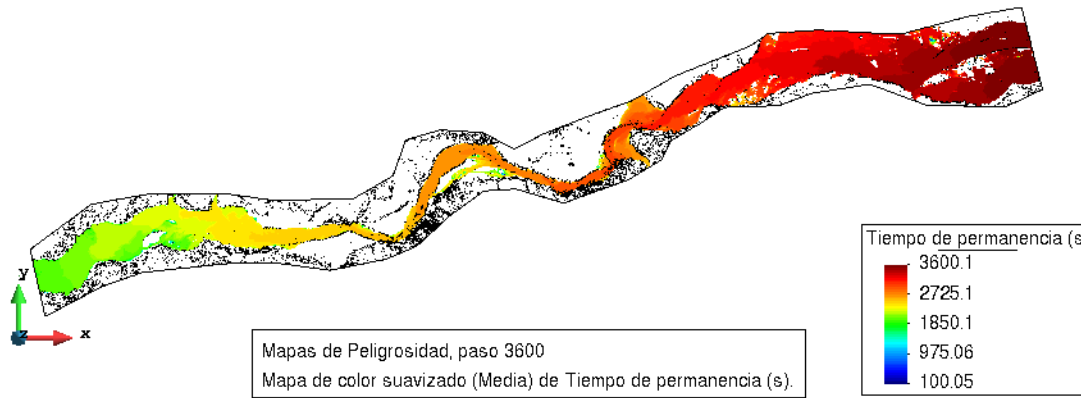
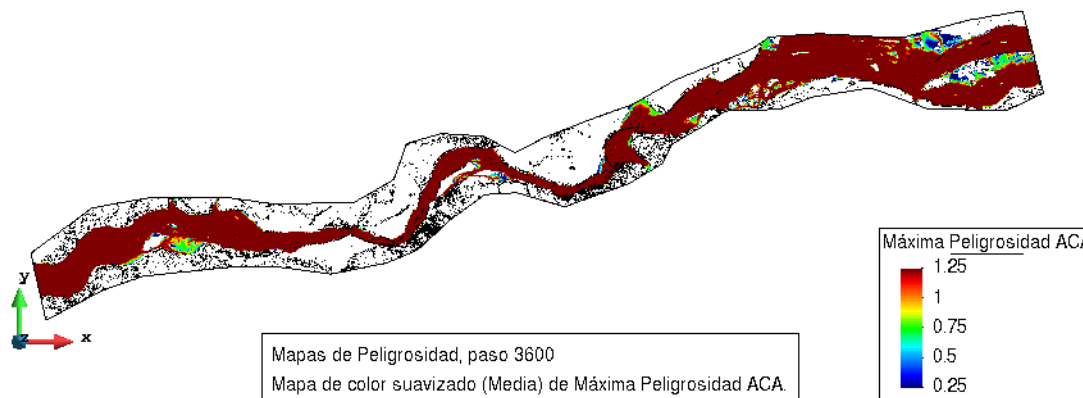
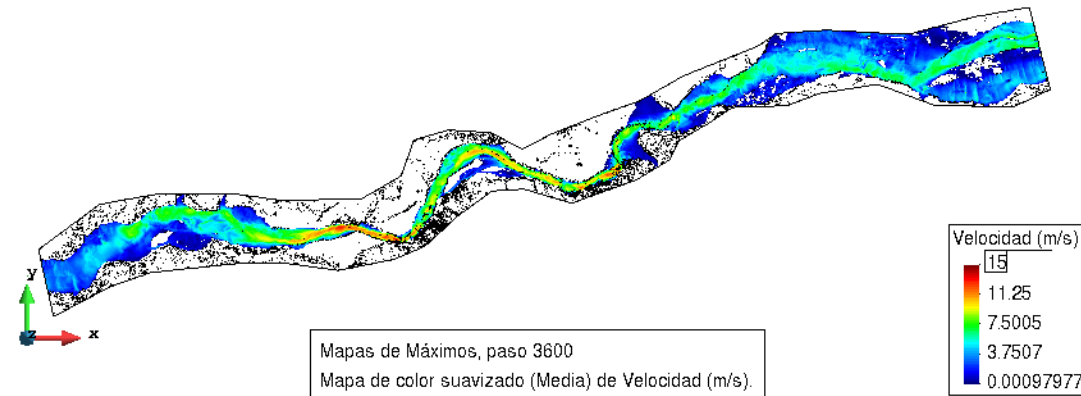
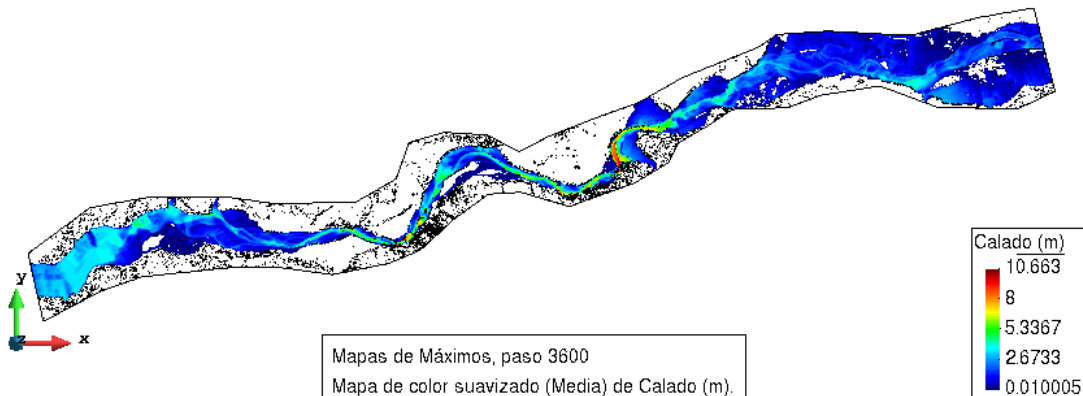
Visualizando el Impacto: ¿Qué y Dónde?

El resultado principal del modelo de propagación son los mapas de peligrosidad, herramientas visuales indispensables para la planificación.

- **Mapa de la Mancha de Inundación (o Zona Inundable):**
 - **¿Qué es?** Delimita el área total que quedaría cubierta por el agua.
 - **Utilidad:** Identifica qué zonas, poblaciones, edificios e infraestructuras se verían afectadas.
- **Mapa de Calados Máximos:**
 - **¿Qué es?** Muestra la profundidad máxima (en metros) que alcanzaría el agua en cada punto de la zona inundable.
 - **Utilidad:** Permite clasificar la peligrosidad (zonas de bajo calado vs. zonas de aguas profundas y peligrosas).



MAPAS: CALADOS, VELOCIDADES, PELIGROSIDADES, PERMANENCIA





¿Cuándo Llegará la Onda de Avenida?

El tiempo es el factor más crítico para una evacuación exitosa.

- **Mapa de Tiempos de Llegada:**

- **¿Qué es?** Muestra cuánto tiempo tardaría el frente de la avenida en alcanzar cada punto desde el inicio de la rotura.
- **Utilidad:** Esencial para activar los sistemas de alerta temprana y definir los plazos de evacuación para cada zona.

- **Mapas de Vulnerabilidad:**

- Combinan la peligrosidad (calado, velocidad) con la exposición (población, tipo de edificios).
- Permiten identificar los **puntos críticos** que requieren una atención prioritaria en el plan de emergencia.



MINIMIZAR EL RIESGO

Los resultados del análisis de rotura no son un fin en sí mismos, sino la herramienta fundamental para crear un **Plan de Emergencias** eficaz.

- **Componentes del Plan informados por el análisis:**

- **Sistema de Alerta a la Población:** ¿A quién avisar y cómo? (sirenas, avisos móviles).
- **Rutas de Evacuación Seguras:** Definidas a partir de los mapas de inundación y tiempos de llegada.
- **Zonas Seguras de Concentración:** Puntos altos y fuera de la mancha de inundación.
- **Protocolos de Actuación:** Para los servicios de emergencia (protección civil, bomberos, policía).
- **Formación y Simulacros:** Para asegurar que el plan se conoce y funciona.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA

HOY

Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales



EL NUEVO DESAFÍO EN LA SEGURIDAD ¿CHALLENGE?

- **Importancia Crítica:** Las balsas y presas son infraestructuras vitales, pero su fallo tiene consecuencias catastróficas.
- **Limitaciones de Enfoques Tradicionales:** Los modelos hidráulicos y numéricos son precisos pero lentos y costosos computacionalmente, dificultando el análisis en tiempo real.
- **La Revolución del Machine Learning (ML):** El ML permite analizar grandes volúmenes de datos (sensores, satélites, históricos) para crear modelos predictivos más rápidos y eficientes.



MODELOS PREDICTIVOS PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA

- **Redes Neuronales Artificiales (ANN):**
 - Utilizadas para predecir fugas y fallos estructurales.
 - Consideran variables como nivel del embalse, temperatura y precipitaciones.
 - Han demostrado una alta precisión, con errores menores al 10% (Ref: Bonet et al., 2025).
- **Aprendizaje Supervisado (Random Forest, SVM):**
 - Clasifican el estado de la balsa (normal vs. anomalía).
 - Permiten emitir alertas tempranas basadas en datos históricos de comportamiento (Ref: Comeras, 2025).



LO MEJOR DE LOS DOS MUNDOS. HIBRIDACIÓN CON MODELOS HIDRÁULICOS

- **Software Híbrido:** Algoritmos de ML complementan y aceleran simuladores tradicionales como Iber o HEC-RAS.
- **Beneficios Clave:**
 - **Aceleración:** Clasificación rápida de la peligrosidad de las balsas.
 - **Optimización:** Análisis eficiente de múltiples escenarios de rotura.
 - **Automatización:** Gestión automática de información crítica para la toma de decisiones (Ref: Sanz-Ramos et al., 2024).



MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL Y ALERTAS PREDICTIVAS

- **Digitalización y Automatización:** El ML procesa en tiempo real los datos de sensores hidrométricos y estructurales.
- **Detección de Patrones Anómalos:** Identifica patrones sutiles e imperceptibles para el análisis humano que pueden preceder a un fallo.
- **Toma de Decisión Proactiva:** Facilita la gestión operativa en condiciones normales y, sobre todo, ante eventos extremos.



- **Simulaciones Masivas:** El uso de técnicas de paralelización permite ejecutar miles de simulaciones en tiempo récord.
- **Análisis de Riesgos Dinámicos:** Esencial para una planificación robusta ante eventos extremos (avenidas, terremotos).
- **Reducción de Tiempos:** Lo que antes tardaba días, ahora se puede procesar en horas o minutos, un factor clave para la gestión de emergencias.



VALIDACIÓN Y CONFIANZA EN LOS MODELOS

- **Precisión Demostrada:** Modelos de Redes Neuronales han alcanzado precisiones con errores inferiores al 10% en la predicción de fugas.
- **Alertas Tempranas Efectivas:** Los clasificadores (Random Forest, SVM) han demostrado su capacidad para identificar anomalías con días de antelación en sets de datos históricos.
- **Impacto en la Gestión del Riesgo:** Aumenta la confianza de los operadores y gestores para tomar decisiones proactivas y fundamentadas en datos.



AYER

Modelizar la Rotura es Construir Seguridad

- El análisis de rotura transforma un riesgo potencial abstracto en un **escenario tangible y gestionable**.
- Es un proceso multidisciplinar que integra **geotecnia, hidrología e hidráulica computacional**.
- Proporciona los **mapas y datos cuantitativos** imprescindibles para una planificación de emergencia efectiva.
- En última instancia, es la **herramienta más poderosa** que tenemos para proteger a las comunidades situadas aguas abajo de presas y balsas.



HOY

- **Avances Consolidados:** El ML ya es una herramienta validada para la predicción y monitorización.
- **Retos Pendientes:**
 - Necesidad de más y mejores datos de entrenamiento.
 - Interpretabilidad de los modelos ("caja negra" de las redes neuronales).
- **Próximos Pasos:**
 - Integración con "Gemelos Digitales" (Digital Twins) de las infraestructuras.
 - Sistemas de alerta totalmente autónomos.



ALGUNAS REFERENCIAS

- A review of artificial intelligence in dam engineering — ScienceDirect (2024).
- A new InSAR-based framework for assessing tailings dam failure risks — ScienceDirect (2025).
- Real time probabilistic inundation forecasts using a LSTM neural network — Journal of Hydrology (2024).
- Investigating the use of PINNs for dam-break scenarios — PLOS/others (2024–2025).
- Sensor Technologies for Safety Monitoring in Mine Tailings — MDPI (2024).
- Tailings Dam Breach Outflow Modelling: A Review — ResearchGate (2024).
- Sentinel-1 InSAR for TMF monitoring — Springer (2024).
- ICOLD/UNECE InSAR presentation (2025).

MUCHAS GRACIAS

FERNANDO ESPEJO ALMODÓVAR

PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD. DIRECTOR ADJUNTO DEL MÁSTER EN MODELIZACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS (USAL)

Dr. Ingeniero Civil

espejo@usal.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN

SECRETARÍA DE ESTADO
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN
Y FORMACIÓN AGROALIMENTARIA



JORNADA “BALSAS EN LOS REGADÍOS DEL MAPA: PRESENTE Y FUTURO”

SEVILLA 25 de SEPTIEMBRE 2025

Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales