



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Implementación de un modelo hidro-sedimentológico distribuido en Tetis para el análisis de crecidas en la Rambla del Poyo a escala diaria y subsidiaria.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Cachay Melly, Jaime Alberto

Tutor/a: Francés García, Félix Ramón

Cotutor/a: Beneyto Ibáñez, Carles

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

# Trabajo Fin de Máster

## *IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO HIDRO- SEDIMENTOLÓGICO DISTRIBUIDO EN TETIS PARA EL ANÁLISIS DE CRECIDAS EN LA L'HORTA SUD DE VALENCIA A ESCALA DIARIA Y SUBDIARIA*

**Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

**Autor:**

*JAIME ALBERTO CACHAY MELLY*

**Tutor:**

*FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA*

**Cotutor:**

*CARLES BENEYTO IBÁÑEZ*

**Septiembre, 2025**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

# Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> Implementación de un modelo hidro-sedimentológico distribuido en TETIS para el análisis de crecidas en L'Horta Sud de Valencia a escala diaria y subdiaria
<b>Título del TFM en inglés:</b> Implementation of a distributed hydro-sedimentological model in TETIS for flood analysis in L'Horta Sud of Valencia at daily and sub-daily scales
<b>Título del TFM en Valenciano:</b> Implementació d'un model hidro-sedimentològic distribuït en TETIS per a l'anàlisi d'avingudes a l'Horta Sud de València a escala diària i subdiària
<b>Alumno:</b> JAIME ALBERTO CACHAY MELLY.
<b>Tutor:</b> FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA
<b>Cotutor:</b> CARLES BENEYTO IBÁÑEZ
<b>Director experimental:</b> -
<b>Fecha de Lectura:</b> Septiembre, 2025

Resumen
<b>En español (máximo 5000 caracteres)</b>
<p>Las cuencas de L'Horta Sud, situadas en la Comunidad Valenciana (España), constituyen un caso representativo de cuencas torrenciales mediterráneas, caracterizadas por fuertes contrastes hidrológicos asociados a su reducido tamaño, la complejidad geomorfológica y la irregularidad del régimen de precipitaciones que están exacerbados por el cambio climático.</p> <p>En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo principal implementar un modelo hidro-sedimentológico distribuido en el software TETIS para analizar el comportamiento hidrológico y el transporte de sedimentos en las cuencas de L'Horta Sud, que incluyen la cuenca Rambla del Poyo, el Barranco de Pozalet y el Barranco de Picassent. El enfoque metodológico adoptado permitió representar la heterogeneidad espacial de las cuencas y generar hidrogramas a escala diaria y subdiaria en diferentes puntos de evaluación hidrológica.</p> <p>El ámbito de calibración y validación con información sistemática corresponde al área drenante a la estación marco Rambla del Poyo. No obstante, se dispuso de diferentes</p>

puntos de control hidrológico dentro de las cuencas de L'Horta Sud, a partir de los cuales se analizaron y contrastaron los caudales asociados a la DANA de octubre de 2024, incluyendo información no sistemática correspondiente a testimonios sobre el estado de los barrancos.

El modelo a escala diaria se implementó en el periodo 1990–2024, empleando tres estaciones pluviométricas (Turís, Rambla del Poyo y Picassent) y una estación de caudales observados en la Rambla del Poyo. La calibración del modelo hidrológico (caudal líquido) se llevó a cabo en el periodo 1996–2010, obteniéndose un Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.52, mientras que la validación se realizó para el periodo 2011–2024, con un NSE de 0.92.

Posteriormente, se procedió a la calibración y validación del submodelo de sedimentos en el periodo 1990–2009, periodo para el cual se dispone de información sobre el estado de los azudes ubicados en la cabecera de la Rambla del Poyo. En este proceso, se empleó el submódulo STEP, el cual permitió utilizar los datos de acumulación de sedimentos en los azudes para ajustar los parámetros de transporte en ladera y cárcavas. Asimismo, mediante el empleo de una relación lineal de sedimentos acumulados, fue posible calibrar los parámetros de transporte en cauces y afinar el de transporte en ladera. Una vez concluida la calibración, se desarrolló una simulación continua con toda la información disponible entre 1920 y 2024 (datos de AEMET), lo que permitió realizar un análisis de frecuencia de los caudales máximos anuales de la serie simulada a escala diaria. Se constató que la inclusión o exclusión del evento de la DANA 2024 ejerce una influencia en los parámetros de la función de distribución LogNormal-2, que resultó ser la mejor ajustada según el criterio Akaike (AIC). En este sentido, considerando o excluyendo el caudal máximo observado durante la DANA ( $553.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ), se asoció el evento a periodos de retorno de 4001 y 1878 años, respectivamente.

Seguidamente, se desarrolló el modelo a escala subdiaria con paso de 10 minutos. Para este modelo se emplearon 19 estaciones de precipitación. La calibración del modelo se realizó con el evento de la DANA 2024. La primera onda simulada mostró una elevada sensibilidad a las condiciones iniciales de humedad. Para resolver este aspecto, se implementó una metodología que consiste en ejecutar previamente el modelo diario con el mismo factor corrector del tanque de almacenamiento estático, obteniendo un NSE de 0.89 para la calibración en el modelo subdiario. Las validaciones temporales del modelo subdiario no fueron tan satisfactorias debido a la limitada disponibilidad de información en eventos históricos, restringida casi exclusivamente a las cinco estaciones del SAIH-CHJ. No obstante, se realizó una validación espacial mediante información no sistemática (testimonios recogidos a través de llamadas al servicio de Emergencias 112), los cuales proporcionaron datos sobre el estado de los barrancos de Pozalet y Rambla del Poyo. Estos testimonios permitieron validar la correspondencia entre las horas de desborde observadas y las simuladas. En esa línea, se identificó que

los desbordes iniciales registrados en Paiporta obedecen principalmente a las aportaciones de los Barrancos de La Horteta y El Gallego, antes que al propio caudal de la Rambla del Poyo.

En conclusión, la aplicación del modelo TETIS a las cuencas de L'Horta Sud ha permitido reproducir la respuesta hidrológica y sedimentológica a diferentes escalas temporales durante el evento extremo reciente de la DANA de octubre de 2024. Los resultados evidencian el valor de los modelos distribuidos para la gestión del riesgo en cuencas mediterráneas, la utilidad de integrar información sistemática y no sistemática, y la necesidad de emplear metodologías en diferentes escalas temporales para mejorar la simulación de caudales pico y tiempos al pico.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

Les conques de l'Horta Sud, situades a la Comunitat Valenciana (Espanya), constitueixen un cas representatiu de conques torrencials mediterrànies, caracteritzades per forts contrastos hidrològics associats a la seua reduïda dimensió, la complexitat geomorfològica i la irregularitat del règim de precipitacions, factors que es veuen agreujats pel canvi climàtic.

En aquest context, el present treball tingué com a objectiu principal implementar un model hidro-sedimentològic distribuït en el programari TETIS per analitzar el comportament hidrològic i el transport de sediments a les conques de l'Horta Sud, que inclouen la conca Rambla del Poyo, el Barranc de Pozalet i el Barranc de Picassent. L'enfocament metodològic adoptat permeté representar l'heterogeneïtat espacial de les conques i generar hidrograms a escala diària i subdiària en diferents punts d'avaluació hidrològica.

L'àmbit de calibratge i validació amb informació sistemàtica correspon a l'àrea drenada a l'estació marc Rambla del Poyo. No obstant això, es disposà de diferents punts de control hidrològic dins de les conques de l'Horta Sud, a partir dels quals s'analitzaren i contrastaren els cabals associats a la DANA d'octubre de 2024, incloent informació no sistemàtica corresponent a testimonis sobre l'estat dels barrancs.

El model a escala diària s'implementà en el període 1990–2024, emprant tres estacions pluviomètriques (Turís, Rambla del Poyo i Picassent) i una estació de cabals observats a la Rambla del Poyo. El calibratge del model hidrològic (cabal líquid) es dugué a terme en el període 1996–2010, obtenint-se un Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.52, mentre que la validació es realitzà per al període 2011–2024, amb un NSE de 0.92. Posteriorment, es procedí al calibratge i validació del submodel de sediments en el període 1990–2009, període per al qual es disposava d'informació sobre l'estat dels assuts situats a la capçalera de la Rambla del Poyo.

En aquest procés s'emprà el submòdul STEP, que permeté utilitzar les dades d'acumulació de sediments als assuts per ajustar els paràmetres de transport en

vessant i xaragalls. Així mateix, mitjançant l'ús d'una relació lineal de sediments acumulats, fou possible calibrar els paràmetres de transport en llits i afinar els de transport en vessant. Una vegada conclòs el calibratge, es desenvolupà una simulació contínua amb tota la informació disponible entre 1920 i 2024 (dades d'AEMET), la qual permeté realitzar una anàlisi de freqüència dels cabals màxims anuals de la sèrie simulada a escala diària. Es constatà que la inclusió o exclusió de l'esdeveniment de la DANA 2024 exerceix una influència en els paràmetres de la funció de distribució LogNormal-2, que resultà ser la millor ajustada segons el criteri d'informació d'Akaike (AIC). En aquest sentit, considerant o exclouent el cabal màxim observat durant la DANA (553.13 m<sup>3</sup>/s), l'esdeveniment s'associà a períodes de retorn de 4001 i 1878 anys, respectivament.

Tot seguit, es desenvolupà el model a escala subdiària amb pas de 10 minuts. Per a aquest model s'empraren 19 estacions de precipitació. El calibratge del model es realitzà amb l'esdeveniment de la DANA 2024. La primera ona simulada mostrà una elevada sensibilitat a les condicions inicials d'humitat. Per resoldre aquest aspecte, s'implementà una metodologia consistent a executar prèviament el model diari amb el mateix factor corrector del tanc d'emmagatzematge estàtic, obtenint-se un NSE de 0.89 per al calibratge en el model subdiari. Les validacions temporals del model subdiari no foren tan satisfactòries a causa de la limitada disponibilitat d'informació en esdeveniments històrics, restringida quasi exclusivament a les cinc estacions del SAIH-CHJ. No obstant això, es realitzà una validació espacial mitjançant informació no sistemàtica (testimonis recollits a través de telefonades al servei d'Emergències 112), que proporcionaren dades sobre l'estat dels barrancs de Pozolet i Rambla del Poyo. Aquests testimonis permeteren validar la correspondència entre les hores de desbordament observades i les simulades. En aquesta línia, s'identificà que els desbordaments inicials registrats a Paiporta obeïen principalment a les aportacions dels barrancs de l'Horteta i el Gallego, abans que al propi cabal de la Rambla del Poyo.

En conclusió, l'aplicació del model TETIS a les conques de l'Horta Sud ha permés reproduir la resposta hidrològica i sedimentològica a diferents escales temporals durant l'esdeveniment extrem recent de la DANA d'octubre de 2024. Els resultats evidencien el valor dels models distribuïts per a la gestió del risc en conques mediterrànies, la utilitat d'integrar informació sistemàtica i no sistemàtica, i la necessitat d'emprar metodologies en diferents escales temporals per millorar la simulació de cabals punta i temps al punta.

#### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

The catchments of L'Horta Sud, located in the Valencian Community (Spain), represent a characteristic case of Mediterranean torrential basins, defined by strong hydrological contrasts associated with their small size, geomorphological complexity, and the

irregular precipitation regime, all of which are exacerbated by climate change.

In this context, the main objective of this work was to implement a distributed hydro-sedimentological model in the TETIS software to analyze the hydrological behavior and sediment transport in the catchments of L'Horta Sud, which include the Rambla del Poyo, the Barranco de Pozalet, and the Barranco de Picassent. The methodological approach adopted allowed representing the spatial heterogeneity of the catchments and generating hydrographs at daily and sub-daily scales in different hydrological evaluation points.

The calibration and validation domain with systematic information corresponds to the drainage area of the Rambla del Poyo benchmark station. However, several additional hydrological control points within the catchments of L'Horta Sud were available, from which the flows associated with the DANA of October 2024 were analyzed and contrasted, including non-systematic information from testimonies regarding the state of the streams.

The daily scale model was implemented for the period 1990–2024, using three rainfall stations (Turís, Rambla del Poyo, and Picassent) and one streamflow gauge at Rambla del Poyo. Hydrological model calibration (liquid flow) was carried out for the period 1996–2010, achieving a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.52, while validation was performed for 2011–2024, with an NSE of 0.92. Subsequently, calibration and validation of the sediment sub-model were conducted for 1990–2009, a period for which information on the state of the check dams located in the headwaters of Rambla del Poyo was available.

In this process, the STEP submodule was employed, which allowed using sediment accumulation data in the check dams to adjust hillslope and gully transport parameters. Likewise, by applying a linear relationship of accumulated sediments, it was possible to calibrate channel transport parameters and refine hillslope transport. Once calibration was completed, a continuous simulation was developed with all available information between 1920 and 2024 (AEMET data), enabling a frequency analysis of the annual maximum flows of the simulated daily series. It was found that the inclusion or exclusion of the 2024 DANA event significantly influences the parameters of the LogNormal-2 distribution, which was identified as the best fit according to the Akaike Information Criterion (AIC). In this sense, considering or excluding the maximum flow observed during the DANA ( $553.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ), the event was associated with return periods of 4001 and 1878 years, respectively.

Subsequently, the sub-daily model with a 10-minute time step was developed. This model used data from 19 rainfall stations. Calibration was performed with the 2024 DANA event. The first simulated flood wave showed high sensitivity to initial soil moisture conditions. To address this aspect, a methodology was implemented consisting of running the daily model in advance with the same correction factor of the

static storage tank, obtaining an NSE of 0.89 for the sub-daily model calibration. Temporal validations of the sub-daily model were less satisfactory due to the limited availability of information on historical events, almost exclusively restricted to the five SAIH-CHJ stations. However, a spatial validation was conducted using non-systematic information (testimonies collected through calls to the Emergency Service 112), which provided data on the state of the Barranco de Pozalet and the Rambla del Poyo. These testimonies allowed validating the correspondence between the observed and simulated overflow times. In this regard, it was identified that the initial overflows recorded in Paiporta were mainly due to the contributions of the Barranco de La Horteta and the Barranco del Gallego, rather than the flow of the Rambla del Poyo itself.

In conclusion, the application of the TETIS model to the catchments of L'Horta Sud made it possible to reproduce the hydrological and sedimentological response at different temporal scales during the recent extreme event of the October 2024 DANA. The results highlight the value of distributed models for risk management in Mediterranean basins, the usefulness of integrating systematic and non-systematic information, and the need to apply methodologies at different temporal scales to improve the simulation of peak flows and time to peak.

**Palabras clave español (máximo 5):** TETIS, modelación distribuida, avenidas, sedimentos, DANA.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** TETIS, modelització distribuïda, avingudes, sediments, DANA.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** TETIS, distributed modelling, flash floods, sediments, DANA.

### ***AGRADECIMIENTOS***

A Félix Francés y Carles Beneyto por su apoyo constante, sus recomendaciones e ideas tan acertadas que hicieron posible la culminación de este trabajo de fin de máster.

### ***DEDICATORIA***

A mis padres y hermano, quienes fueron un pilar importante y una fuente de inspiración durante el desarrollo y culminación del máster.

## Índice

1.	Introducción .....	17
1.1.	Marco general.....	17
1.2.	Objetivos.....	18
1.2.1.	Objetivo general .....	18
1.2.2.	Objetivos específicos .....	18
1.3.	Justificación .....	18
2.	Modelo TETIS.....	20
2.1.	Submodelo hidrológico.....	20
2.1.1.	Mapas de parámetros y factores correctores .....	21
2.1.2.	Tanque de intercepción.....	22
2.1.3.	Tanque de almacenamiento estático .....	23
2.1.4.	Tanque de almacenamiento superficial .....	25
2.1.5.	Tanque de almacenamiento gravitacional .....	26
2.1.6.	Tanque de almacenamiento subterráneo .....	27
2.1.7.	Transferencia horizontal.....	28
2.1.8.	Onda cinemática geomorfológica .....	29
2.2.	Submodelo de sedimentos .....	29
2.2.1.	Proceso de transporte en ladera .....	30
2.2.2.	Proceso de transporte en cárcavas y cauce .....	31
2.2.3.	Parámetros del submodelo de sedimentos .....	33
2.2.4.	Condiciones iniciales.....	33
2.3.	Submodelo de sedimentación en azudes.....	38
2.3.1.	Balace líquido .....	38
2.3.2.	Balace de sedimentos.....	40
3.	Caso de estudio .....	43
3.1.	Parámetros del modelo hidrológico .....	44
3.1.1.	Modelo de elevación digital .....	45
3.1.2.	Parámetros relacionados al suelo .....	48
3.1.3.	Parámetros relacionados al acuífero.....	50

3.1.4.	Cubierta del suelo.....	51
3.1.5.	Parámetros geomorfológicos .....	52
3.2.	Mapas del modelo de sedimentos .....	53
3.2.1.	Textura del suelo .....	53
3.2.2.	Factores de erosión (USLE).....	55
3.3.	Información hidrometeorológica .....	57
3.3.1.	Sistema Automático de Información Hidrológica .....	57
3.3.2.	Sistema de Información Agroclimática para el Regadío.....	59
3.3.3.	Agencia Estatal de Meteorología .....	61
3.3.4.	Asociación Valenciana de Meteorología .....	61
3.4.	Información para la calibración del modelo de sedimentos.....	63
4.	Implementación del modelo diario .....	66
4.1.	Selección de estaciones.....	66
4.2.	Modelo hidrológico .....	67
4.3.	Modelo sedimentológico.....	70
4.4.	Análisis del caudal total simulado .....	74
4.5.	Análisis de frecuencia periodo 1920 - 2024 .....	75
4.5.1.	Análisis de frecuencia con DANA 2024.....	78
4.5.2.	Análisis de frecuencia sin DANA 2024 .....	80
5.	Implementación del modelo subdiario .....	83
5.1.	Selección de estaciones y eventos subdiario .....	83
5.1.1.	Identificación de eventos .....	83
5.1.2.	Comparación de escalas temporales y caudal pico.....	85
5.2.	Calibración del modelo subdiario.....	86
5.3.	Validación del modelo subdiario .....	89
5.4.	Histéresis .....	95
5.5.	Análisis de la DANA 2024.....	98
5.5.1.	Resultados en puntos de control.....	100
5.5.2.	Validación espacial con información no sistemática.....	111
6.	Conclusiones.....	113
7.	Bibliografía.....	115

## Índice de Figuras

Figura 1. Modelo hidrológico conceptual en TETIS. ....	20
Figura 2. Movimiento horizontal del modelo conceptual en Tetis (simplificación 2D). 21	
Figura 3. Esquema del tanque de intercepción (T6). ....	22
Figura 4. Esquema del tanque de almacenamiento estático (T1). ....	23
Figura 5. Esquema del tanque de almacenamiento superficial (T2). ....	25
Figura 6. Esquema del tanque de almacenamiento gravitacional en la capa superior del suelo (T3). ....	26
Figura 7. Esquema del tanque de almacenamiento subterráneo en la capa inferior del suelo (T3). ....	28
Figura 8. Curva de suministro y capacidad de transporte de la corriente. ....	30
Figura 9. Esquema de los procesos de ladera en TETIS. ....	31
Figura 10. Esquema de los procesos de cárcavas y cauce en TETIS. ....	32
Figura 11. Curva única. ....	35
Figura 12. Bucle sentido antihorario. ....	35
Figura 13. Bucle sentido horario. ....	36
Figura 14. Bucle en forma de ocho. ....	36
Figura 15. Bucle más amplio. ....	37
Figura 16. Casual. ....	37
Figura 17. Bucle y curva única. ....	38
Figura 18. Sección transversal de un azud dividido en cámaras de áreas equivalentes. ....	39
Figura 19. Modificación del nivel de agua en caso de compartimentos vacíos. ....	40
Figura 20. Modificación de la masa de sedimentos transportados a compartimentos. ....	41
Figura 21. Cuencas de L'Horta Sud. ....	44
Figura 22. Área drenante de la estación Rambla del Poyo. ....	45
Figura 23. Modelo de elevación digital del ámbito del estudio. ....	46
Figura 24. Velocidad en ladera (m/s) en el ámbito de estudio. ....	47
Figura 25. Almacenamiento estático del suelo (mm) en el ámbito de estudio. ....	48
Figura 26. Capacidad de infiltración Ks y conductividad hidráulica del interflujo Kss. ...	49
Figura 27. Parámetro de la capacidad de percolación. ....	50

Figura 28. Distribución espacial de los factores de cultivo. ....	52
Figura 29. Textura del suelo - porcentaje de arena (%). ....	54
Figura 30. Textura del suelo - porcentaje de limo (%). ....	54
Figura 31. Textura del suelo - porcentaje de arcilla (%). ....	55
Figura 32. Factor de la cubierta de suelo (Factor C).....	56
Figura 33. Factor de la erosionabilidad del suelo (Factor K) .....	57
Figura 34. Pluviómetros preseleccionados en el buffer de 15 km .....	59
Figura 35. Estaciones de evapotranspiración potencial (SIAR) .....	60
Figura 36. Disponibilidad de información en las estaciones de AEMET.....	61
Figura 37. Estaciones AVAMET seleccionadas.....	62
Figura 38. Ubicación de los azudes en el ámbito de estudio. ....	63
Figura 39. Áreas afectadas y zonas de interés. ....	65
Figura 40. Pluviómetros seleccionados en el modelo diario.....	66
Figura 41. Errores relativos respecto a la simulación anterior – caudales líquidos.....	69
Figura 42. Calibración del modelo hidrológico a escala diaria (1996-2010). ....	69
Figura 43. Validación del modelo hidrológico a escala diaria (2011-2024). ....	70
Figura 44. Simulación completa del caudal líquido a escala diaria (1990-2024). ....	70
Figura 45. Errores relativos respecto a la simulación anterior – caudales sólidos. ....	72
Figura 46. Calibración del modelo de sedimentos – puntos de control en azudes. ....	73
Figura 47. Simulación completa del caudal total a escala diaria (1990-2024). ....	75
Figura 48. Ubicación de las estaciones de AEMET para la simulación 1920-2024.....	76
Figura 49. Disponibilidad de información de las estaciones AEMET (1920-2024). ....	77
Figura 50. Plotting positions y función de distribución Log-Normal 2 con DANA 2024. 79	
Figura 51. Caudales máximos anuales y periodo de retorno con DANA 2024.....	80
Figura 52. Plotting positions y función de distribución Log-Normal 2 sin DANA 2024. .	81
Figura 53. Caudales máximos anuales y periodo de retorno sin DANA 2024. ....	82
Figura 54. Análisis de influencia de la distancia sobre la máxima precipitación calculada. ....	83
Figura 55. Caudal máximo diario en la estación Rambla del Poyo (1988 - 2024). ....	84
Figura 56. Correlación entre caudal medio diario y caudal pico 10 minutil. ....	86
Figura 57. Diagrama de calibración iterativa del FC1 entre modelo diario y subdiario. 87	

Figura 58. Calibración del modelo subdiario – evento de la DANA 2024. ....	88
Figura 59. Evolución temporal de la contribución de sedimentos al caudal total – DANA 2024. ....	89
Figura 60. Validación temporal con el evento de octubre 2000. ....	90
Figura 61. Validación temporal con el evento de septiembre 2001. ....	91
Figura 62. Validación temporal con el evento de julio 2005. ....	91
Figura 63. Validación temporal con el evento de mayo 2007. ....	91
Figura 64. Validación temporal con el evento de octubre 2008. ....	92
Figura 65. Validación temporal con el evento de marzo 2015. ....	92
Figura 66. Validación temporal con el evento de noviembre 2015. ....	92
Figura 67. Validación temporal con el evento de diciembre 2016. ....	93
Figura 68. Validación temporal con el evento de noviembre 2018. ....	93
Figura 69. Validación temporal con el evento de noviembre 2020. ....	93
Figura 70. Validación temporal con el evento de septiembre 2021. ....	94
Figura 71. Validación temporal con el evento de marzo 2022. ....	94
Figura 72. Evolución temporal de la contribución de sedimentos al caudal total – evento 2000. ....	95
Figura 73. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento DANA 2024. ....	96
Figura 74. Histéresis de la primera onda del evento DANA 2024. ....	96
Figura 75. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento octubre 2000. ....	97
Figura 76. Histéresis de la tercera onda del evento octubre 2000. ....	97
Figura 77. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento octubre 2008. ....	98
Figura 78. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento marzo 2022. ....	98
Figura 79. Ubicación de los puntos de evaluación hidrológica. ....	100
Figura 80. Caudales simulados en el punto de evaluación “P02”. ....	100
Figura 81. Caudales simulados en el punto de evaluación “P03”. ....	101
Figura 82. Caudales simulados en el punto de evaluación “P04”. ....	101
Figura 83. Caudales simulados en el punto de evaluación “P05”. ....	102
Figura 84. Caudales simulados en el punto de evaluación “P06”. ....	102
Figura 85. Caudales simulados en el punto de evaluación “P07”. ....	103
Figura 86. Caudales simulados en el punto de evaluación “P08”. ....	103

Figura 87. Caudales simulados en el punto de evaluación "P09" . . . . .	104
Figura 88. Caudales simulados en el punto de evaluación "P10" . . . . .	104
Figura 89. Caudales simulados en el punto de evaluación "P11" . . . . .	105
Figura 90. Caudales simulados en el punto de evaluación "P12" . . . . .	105
Figura 91. Caudales simulados en el punto de evaluación "P13" . . . . .	106
Figura 92. Caudales simulados en el punto de evaluación "P14" . . . . .	106
Figura 93. Caudales simulados en el punto de evaluación "P15" . . . . .	107
Figura 94. Caudales simulados en el punto de evaluación "P16" . . . . .	107
Figura 95. Caudales simulados en el punto de evaluación "P17" . . . . .	108
Figura 96. Caudales simulados en el punto de evaluación "P18" . . . . .	108
Figura 97. Caudales simulados en el punto de evaluación "P19" . . . . .	109
Figura 98. Caudales simulados en el punto de evaluación "P20" . . . . .	109
Figura 99. Caudales simulados en el punto de evaluación "P21" . . . . .	110

## Índice de Tablas

Tabla 1. Tamaño medio del grano y velocidad media de sedimentación en TETIS .....	30
Tabla 2. Estadísticos descriptivos del MDT (m).....	46
Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la velocidad de ladera (m/s).....	47
Tabla 4. Estadísticos descriptivos del almacenamiento estático (mm).....	48
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de infiltración (mm/h).....	49
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la capacidad de percolación (mm/h).....	51
Tabla 7. Parámetros geomorfológicos .....	53
Tabla 8. Estaciones pluviométricas del SAIH-CHJ .....	58
Tabla 9. Estaciones foronómica empleada en el estudio .....	58
Tabla 10. Estaciones empleadas de la red del SIAR .....	59
Tabla 11. Evapotranspiración de referencia (mm/día) en las estaciones del SIAR.....	60
Tabla 12. Estaciones pluviométricas de AEMET .....	61
Tabla 13. Estaciones pluviométricas de AVAMET .....	62
Tabla 14. Características de los azudes .....	63
Tabla 15. Características de los azudes y sedimentos depositados .....	64
Tabla 16. Precipitación media en la DANA 2024 según combinación de estaciones pluviométricas .....	67
Tabla 17. Factores correctores empleados en el modelo a escala diaria .....	68
Tabla 18. Resumen de simulación en los eventos del 2000 y 2024 .....	74
Tabla 19. Índice de Nash-Sutcliffe del caudal total, caudal líquido y caudal observado	75
Tabla 20. Estadística descriptiva de caudales máximos anuales simulados .....	78
Tabla 21. Resultados del ajuste de máximos anuales de caudal diario– con DANA 2024 .....	79
Tabla 22. Cuantiles de las funciones de distribución – con DANA 2024 .....	79
Tabla 23. Caudales diarios máximos y periodos de retorno –con DANA 2024.....	80
Tabla 24. Resultados del ajuste de máximos anuales de caudal diario– sin DANA 2024 .....	81
Tabla 25. Cuantiles de las funciones de distribución – sin DANA 2024 .....	81
Tabla 26. Caudales diarios máximos y periodos de retorno – sin DANA 2024 .....	82
Tabla 27. Comparación de caudales pico ( $m^3/s$ ) a diferente escala temporal.....	85

Tabla 28. Factores correctores empleados en el modelo hidrológico a escala subdiaria .....	88
Tabla 29. NSE en los eventos de validación (caudal total simulado - caudal observado) .....	90
Tabla 30. Puntos de evaluación hidrológica .....	99
Tabla 31. Caudal pico y tiempo al pico simulado .....	110

## **1. Introducción**

### **1.1. Marco general**

Los cursos de agua efímeros son característicos de cuencas mediterráneas y regiones semiáridas, donde, desde una perspectiva hidrológica, se encuentran hidráulicamente desconectados del acuífero (Camarasa-Belmonte, 2016). En consecuencia, el flujo superficial depende exclusivamente de los eventos de precipitación (Borga et al., 2014). Los rasgos distintivos de cursos de agua efímeros en cuencas mediterráneas: la elevada irregularidad de las lluvias, la concentración de avenidas en lapsos muy breves y la marcada variabilidad estacional, plantean desafíos particulares para su análisis y gestión. Estos sistemas, cuyos cauces permanecen secos durante gran parte del año, pueden registrar crecidas repentinas de gran magnitud (avenidas relámpago) bajo condiciones meteorológicas extremas, como las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA). Dichos episodios generan picos de caudal capaces de movilizar grandes volúmenes de agua y sedimentos, provocando modificaciones significativas en la morfología fluvial en escalas de tiempo muy reducidas.

Las cuencas de L'Horta Sud, situadas en la Comunidad Valenciana, constituyen un caso representativo de cuencas torrenciales mediterráneas, cuya dinámica hidro-sedimentológica se caracteriza por fuertes contrastes derivados de su reducido tamaño, su configuración morfológica y el régimen climático propio de la región (Camarasa Belmonte, 2006; Dick et al., 1997). Estas cuencas están conformadas por la Rambla del Poyo, el Barranco de Pozalet y el Barranco de Picassent, siendo la Rambla del Poyo la única que cuenta con información hidrométrica. En particular, la parte alta de la Rambla del Poyo está conformada por barrancos encajados en materiales calcáreos, mientras que en los tramos bajos predominan fondos planos desarrollados sobre depósitos margo-arcillosos (Camarasa Belmonte, 1990). Esta disposición geomorfológica, junto con la elevada pendiente en cabecera y la irregularidad de las precipitaciones, determina de manera directa la respuesta hidrológica y sedimentológica del sistema.

La combinación de una alta peligrosidad hidrológica y sedimentológica, junto con la vulnerabilidad del entorno, hacen que las cuencas de L'Horta Sud sean especialmente sensibles a episodios de avenida y transporte masivo de sedimentos. A ello se suma la limitada disponibilidad de datos hidrometeorológicos y sedimentológicos en la cuenca, lo cual dificulta la caracterización directa de los procesos. Estos factores, además, se ven agravados por los cambios en los patrones meteorológicos asociados al cambio climático, que incrementan la frecuencia e intensidad de episodios extremos y elevan la incertidumbre en la estimación de caudales de avenida (Granata et al., 2025). En este contexto, se hace imprescindible disponer de modelos hidro-sedimentológicos robustos, capaces de funcionar en distintas escalas temporales y espaciales, reducir los niveles de incertidumbre y proporcionar un marco fiable para la simulación de eventos

de crecida pasados y futuros. En particular, el uso combinado de modelos a escala diaria y subdiaria es fundamental para estimar con mayor precisión las condiciones iniciales durante un evento de crecida. El modelo a escala diaria, de carácter continuo, ofrece información sobre la humedad del suelo, una variable de estado clave para el modelo subdiario, ya que determina en gran medida la adecuada representación del caudal pico y del tiempo al pico.

El análisis de las avenidas en ramblas mediterráneas exige un enfoque integrador que combine, dentro de un mismo marco metodológico, la modelización del flujo superficial y del transporte de sedimentos. En este sentido, el modelo distribuido TETIS se presenta como una herramienta adecuada al permitir representar la heterogeneidad espacial de la cuenca y simular de forma conjunta el caudal líquido y sólido, tanto en simulaciones continuas como de evento. Su aplicación posibilita contrastar los resultados frente a observaciones, evaluar la respuesta del modelo a diferentes escalas temporales, como la diaria y subdiaria, y analizar su capacidad para reproducir episodios extremos, como el ocurrido durante la DANA de octubre de 2024.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Implementar un modelo hidro-sedimentológico distribuido en TETIS para el análisis de crecidas en la Rambla del Poyo a escala diaria y subdiaria.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Calibrar y validar un modelo hidrológico a escala diaria utilizando series continuas disponibles entre 1990 y 2024.
- Calibrar y validar un modelo sedimentológico a escala diaria a partir de información disponible en azudes y del volumen movilizado en la DANA de 2024.
- Calibrar un modelo hidro-sedimentológico a escala subdiaria (10 minutas) para reproducir el evento de la DANA de 2024.
- Validar el modelo hidro-sedimentológico a escala subdiaria mediante registros de crecidas históricas representativas.
- Analizar la capacidad del modelo para representar la dinámica hidro-sedimentológica durante la DANA de 2024, considerada como caso de estudio principal en diferentes puntos de control hidrológico.

## **1.3. Justificación**

Las cuencas de L'Horta Sud, ubicadas en la Comunidad Valenciana, presenta una dinámica hidrológica marcada por eventos de crecida súbita conocidas como avenidas relámpago (*flash floods*). Particularmente, la cuenca Rambla del Poyo presenta rasgos morfológicos como: barrancos encajados con base calcárea en la cabecera de cuenca, fondo plano sobre materiales margo-arcillosos en el piedemonte, meandros de amplia

curvatura, tramos de cauce trenzado y elevada carga de fondo (Camarasa Belmonte, 1990). Estas características favorecen una alta producción de escorrentía y una intensa movilización de sedimentos, especialmente durante episodios de precipitaciones extremas, como las asociadas a la DANA registrada el 29 de octubre de 2024.

En este contexto, el modelado hidro-sedimentológico resulta esencial para comprender la dinámica conjunta del caudal líquido y sólido durante los eventos de crecida. No obstante, la complejidad de los procesos, junto con la variabilidad temporal de los registros y la limitada información disponible, dificulta su implementación directa. Por ello, se hace necesario identificar la información disponible, seleccionar adecuadamente la información y usar distintas escalas temporales, la diaria y subdiaria (10 minutas) cuyo uso conjunto permite una mejor estimación de los estados iniciales del sistema.

Ante este reto, el modelo TETIS se plantea como una herramienta idónea para integrar la simulación hidrológica y sedimentológica distribuida, ya que permite trabajar en distintas escalas temporales y reproducir los procesos de generación de escorrentía y transporte de sedimentos en la Rambla del Poyo. En este sentido, el presente trabajo responde a la necesidad de contar con modelos hidro-sedimentológicos distribuidos capaces de analizar en detalle eventos de crecida y transporte de sedimentos, en particular el episodio de la DANA de 2024. Los resultados obtenidos permitirán avanzar en la comprensión de la dinámica de avenidas torrenciales en cuencas mediterráneas y, de manera aplicada, podría contribuir a mejorar la delimitación de Zonas Inundables (ZI) y servir de apoyo a instrumentos de planificación territorial, reforzando la base técnica disponible para la gestión del riesgo en la Comunidad Valenciana.

## 2. Modelo TETIS

### 2.1. Submodelo hidrológico

TETIS es un modelo hidrológico distribuido que simula la producción y propagación de la escorrentía en una cuenca a partir del balance hídrico, considerando una discretización del área de estudio en celdas homogéneas y de forma cuadrada. Su flexibilidad permite adaptarse a diferentes escalas temporales y espaciales según los objetivos y el alcance del proyecto. Además, facilita el análisis tanto de la disponibilidad de recursos hídricos, así como de los eventos extremos, como las crecidas, que son el foco del presente estudio.

El esquema conceptual del modelo TETIS se presenta en la Figura 1. En este esquema, se representa el balance a nivel de celda, que es la unidad mínima para el balance hídrico y cuyas dimensiones es menor al tamaño de la ladera. Además, los  $X_i$  representan los flujos internos dentro del modelo (flujos de entrada hacia los nodos), mientras que los  $Y_i$  corresponden a los flujos de salida, tal como la evapotranspiración, la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base. Por otro lado, las  $H_i$  indican la capacidad de almacenamiento de cada tanque, las  $D_i$  representan las entradas a cada tanque y, finalmente, las  $T_i$  simbolizan los tanques conceptuales del modelo, que en total son siete, desde  $T_0$  hasta  $T_6$ .

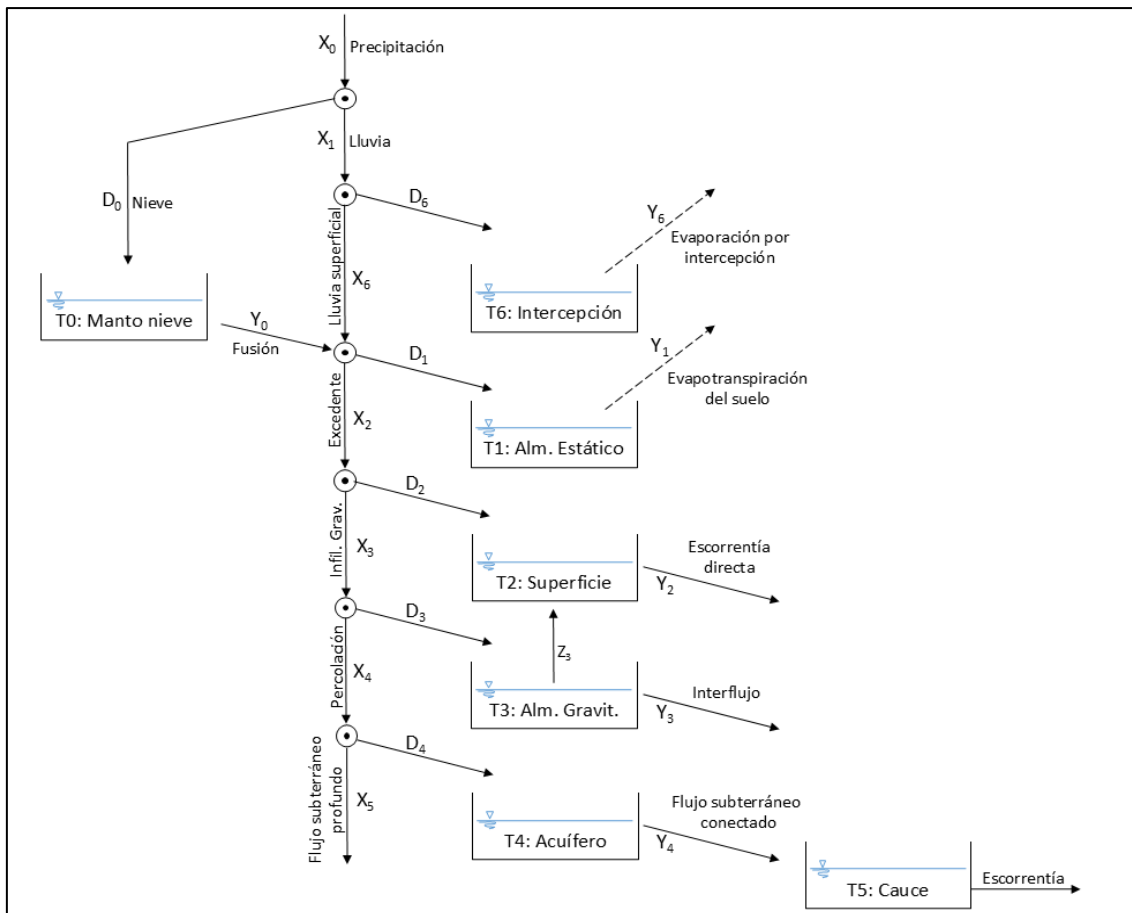


Figura 1. Modelo hidrológico conceptual en TETIS.

Fuente: GIMHA (2021).

El sistema se organiza en tres componentes claramente diferenciados, delimitados por áreas umbral que determinan el inicio de la escorrentía superficial en sus distintas formas. Estas áreas umbral coinciden espacialmente con la red de drenaje natural, compuesta por cárcavas y cauces, donde tienden a concentrarse los flujos de agua. En la Figura 2 se presenta un esquema conceptual que ilustra la estructura del modelo y la generación de escorrentía. Cabe destacar que, previo al desarrollo de cárcavas, la escorrentía se genera a nivel de ladera. A medida que se superan ciertas áreas umbral, esta escorrentía superficial, junto con el flujo subsuperficial, comienza a concentrarse en las cárcavas. Finalmente, en áreas aún mayores, se forman cauces definidos, los cuales integran además un componente adicional: el flujo base.

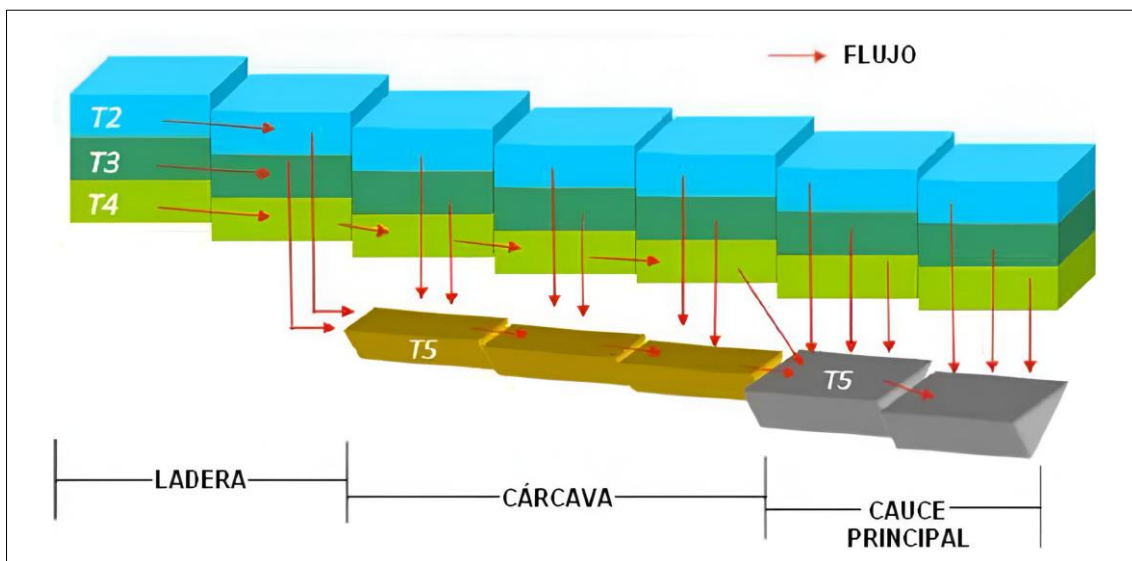


Figura 2. Movimiento horizontal del modelo conceptual en Tetis (simplificación 2D).

Fuente: GIMHA (2021).

### 2.1.1. Mapas de parámetros y factores correctores

De acuerdo con el modelo conceptual de TETIS y su implementación, se requiere la incorporación de un conjunto de capas espaciales en formato ráster ASCII que representen las condiciones físicas del terreno. Entre los insumos fundamentales se encuentran la velocidad del flujo en ladera, el mapa de coberturas del suelo y el modelo digital de elevaciones (MDE) y sus derivados, tales como: mapa de pendientes, dirección de flujo, celdas acumuladas. Adicionalmente se requiere de información de propiedades hidráulicas tales como almacenamiento estático del suelo, capacidad de infiltración, capacidad de percolación, conductividad hidráulica del interflujo, conductividad hidráulica del acuífero, capacidad de pérdidas hacia el acuífero profundo.

Estos mapas permiten representar la variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos que influyen en la respuesta de la cuenca. Adicionalmente, el modelo TETIS incorpora la posibilidad de ajustar estos mapas de parámetros a través de los denominados factores correctores (FC). Estos factores son coeficientes multiplicativos aplicados de manera uniforme a cada capa de parámetros, y son calibrados y validados

mediante procesos iterativos de ajuste entre los resultados simulados y los datos observados.

La aplicación de los factores correctores permite obtener los denominados parámetros efectivos. En total, el modelo TETIS contempla nueve factores correctores, los cuales se describen a continuación:

- FC1: corrige al mapa de almacenamiento estático.
- FC2: corrige la evapotranspiración.
- FC3: corrige el mapa de capacidad de infiltración.
- FC4: corrige la escorrentía directa.
- FC5: corrige el mapa de capacidad de percolación.
- FC6: corrige el mapa de conductividad hidráulica interflujo.
- FC7: corrige el mapa de pérdidas al acuífero profundo.
- FC8: corrige el mapa de conductividad hidráulica del acuífero.
- FC9: corrige la velocidad de propagación (onda cinemática geomorfológica)

### 2.1.2. Tanque de intercepción

El primer tanque de almacenamiento (Figura 3) es el de intercepción (T6) que representa la fracción de precipitación líquida interceptada por la vegetación dentro de la cuenca. Su estructura conceptual incluye una única entrada (D6) y una salida (Y6) que corresponden, respectivamente, a la lluvia atrapada en la cubierta vegetal y a su posterior evaporación.

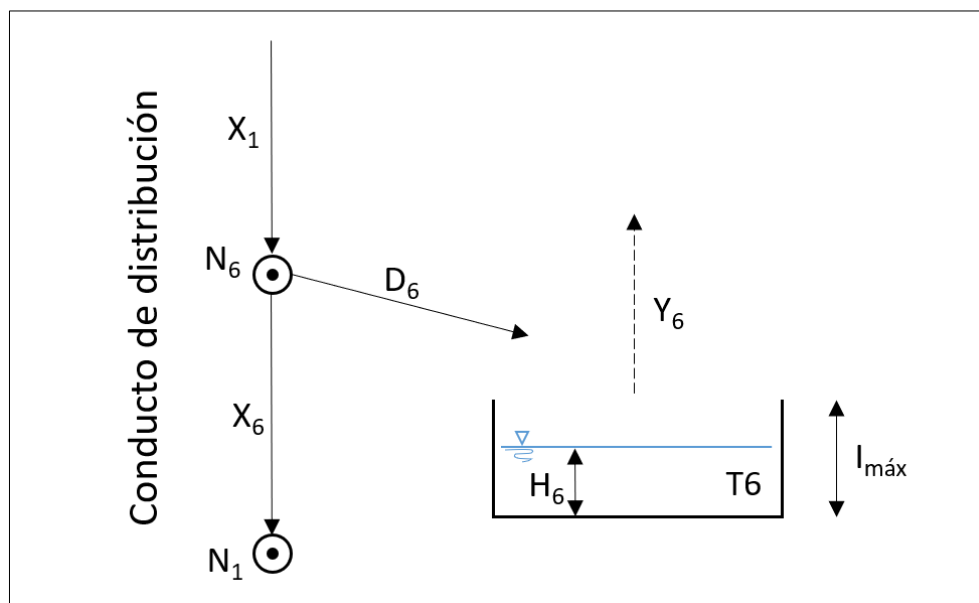


Figura 3. Esquema del tanque de intercepción (T6).

Fuente: GIMHA (2021).

La capacidad máxima de almacenamiento de este tanque ( $I_{m\acute{a}x}$ ) representa la capacidad máxima de intercepción de agua en condiciones de máximo follaje y depende del tipo de vegetación presente, es decir, la cantidad de agua que puede ser retenida varía según las características específicas de la cobertura vegetal. Por otro

lado, el coeficiente de vegetación ( $\lambda v$ ) permite modificar la capacidad máxima de almacenamiento mediante doce valores mensuales que permite rescatar la variabilidad temporal de la cobertura vegetal.

En cuanto a la evaporación de la intercepción (salida del tanque), esta se estima mediante el producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), el coeficiente de vegetación ( $\lambda v$ ) y el factor corrector ( $FC_2$ ).

Las ecuaciones de balance utilizadas son las siguientes:

$$D_6 = X_1 - X_6$$

$$H_6 = H_6 + X_1 - X_6$$

$$X_6 = \text{mín}[0; X_1 - D_6]$$

$$Y_6 = \text{mín}[H_6; ET_0 \cdot FC_2 \cdot \lambda v]$$

### 2.1.3. Tanque de almacenamiento estático

El tanque de almacenamiento representa los volúmenes de agua que son almacenados temporalmente en charcos y en los microporos del suelo, particularmente en la zona de enraizamiento, dentro del intervalo comprendido entre el punto de marchitez y la capacidad de campo. El estado de llenado del tanque de almacenamiento estático depende de la precipitación que alcanza la superficie sin ser interceptada por la vegetación, así como el aporte proveniente de la fusión de nieve y del riego (Figura 4).

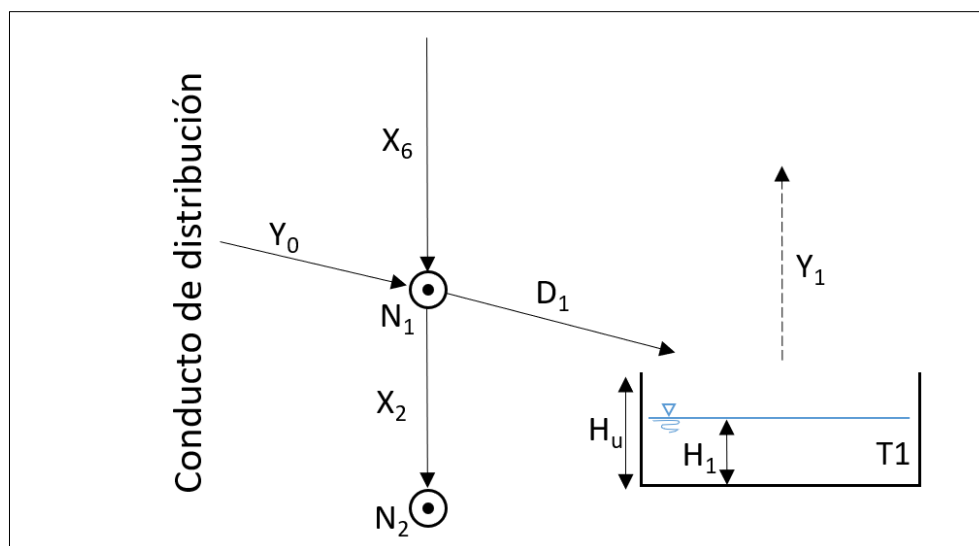


Figura 4. Esquema del tanque de almacenamiento estático (T1).

Fuente: GIMHA (2021).

Las salidas de agua de este tanque corresponden a la evapotranspiración del suelo y a la evaporación del agua acumulada en los charcos. El excedente de agua, denominado X2 o agua azul, es responsable de generar la escorrentía directa, la infiltración y la percolación. Por otro lado, el flujo de ingreso al tanque (infiltración capilar), identificado como D1 o agua verde, corresponde al volumen retenido en el suelo que

posteriormente se pierde por evapotranspiración del suelo y evaporación en charcos (Y1). La infiltración capilar se calcula de la siguiente manera:

$$D1 = \min \left[ Hu.FC1 - H1; (X6 + Y0) \cdot \left( 1 - \frac{H1}{Hu.FC1} \right)^{p1} \right]$$

El parámetro p1 controla el inicio del excedente de agua. Si p1 es igual a cero, el excedente solo se generará cuando el tanque alcance su saturación, y la capacidad de infiltración será infinita cuando la humedad del suelo esté por debajo de la capacidad de campo. Caso contrario sucede cuando p1 es mayor que cero, que significa que habrá excedente antes de que se complete la capacidad máxima de almacenamiento estático. El factor corrector FC1 multiplica directamente a la capacidad máxima del tanque T1. Es así como la primera ecuación de balance permite calcular la cantidad de agua que se deriva al segundo nodo N2 mediante la siguiente expresión.

$$X_2 = \max[0; X6 + Y0 - D1]$$

Posteriormente, se actualiza la cantidad de agua almacenada en el tanque de almacenamiento estático según la siguiente ecuación.

$$H1 = H1 + X6 + Y0 - X2$$

Si bien el efecto de la evapotranspiración puede despreciarse, en cuencas de gran tamaño y/o con grandes espejos de agua podría ser importante su inclusión. El cálculo de la evapotranspiración Y1 se realiza mediante la siguiente expresión.

$$Y1 = \min[H1; (ET0.FC2 - Y6) \cdot \lambda v \cdot f(\theta)]$$

Si la opción de vegetación dinámica está desactivada, el tanque de interceptación es anulada y en ese caso el tanque de almacenamiento estático contempla las abstracciones iniciales, por la cobertura vegetal y charcos, y el agua capilar del suelo.

Para la estimación del almacenamiento estático Hu es necesario conocer la profundidad del suelo, además de la capacidad de almacenamiento entre el punto de marchitez y la capacidad de campo, considerando la profundidad del suelo. Dado que estas propiedades del suelo no suelen ser medidas directamente en campo, es común emplear funciones de pedotransferencia. Estas funciones permiten estimar las propiedades del perfil del suelo (pedón) a partir de parámetros fisicoquímicos como la textura, el potencial de hidrógeno (pH), el contenido de materia orgánica, entre otros.

$$H_u = \frac{\rho_b \cdot p \cdot (CC - PM)}{\rho_w \cdot 100} + RetMax$$

Donde:

- Hu es la máxima capacidad de almacenamiento estático (mm)
- $\rho_b$  es la densidad aparente del suelo seco
- $\rho_w$  es la densidad del agua
- p es la profundidad del suelo (mm)

- CC es la capacidad de campo (%)
- PM es el punto de marchitez (%)
- RetMax es la máxima capacidad en charcos o abstracciones iniciales

#### 2.1.4. Tanque de almacenamiento superficial

El tanque de almacenamiento superficial representa el agua acumulada en la ladera, la cual puede infiltrarse en el suelo o generar escorrentía directa (Figura 5). Las entradas al tanque provienen del excedente del tanque de almacenamiento estático (X<sub>2</sub>), la escorrentía directa generada desde zonas más altas de la cuenca (Y<sub>2</sub><sup>\*</sup>) y el excedente (Z<sub>3</sub>) del tanque de almacenamiento gravitacional (T<sub>3</sub>) mediante el mecanismo de Dunne. Las salidas del tanque corresponden a la escorrentía directa (Y<sub>2</sub>) y mediante balance en el nodo N<sub>2</sub>, la infiltración gravitacional (X<sub>3</sub>). La infiltración gravitacional está controlada por la conductividad hidráulica vertical del suelo (K<sub>s</sub>) con humedad mayor a la capacidad de campo.

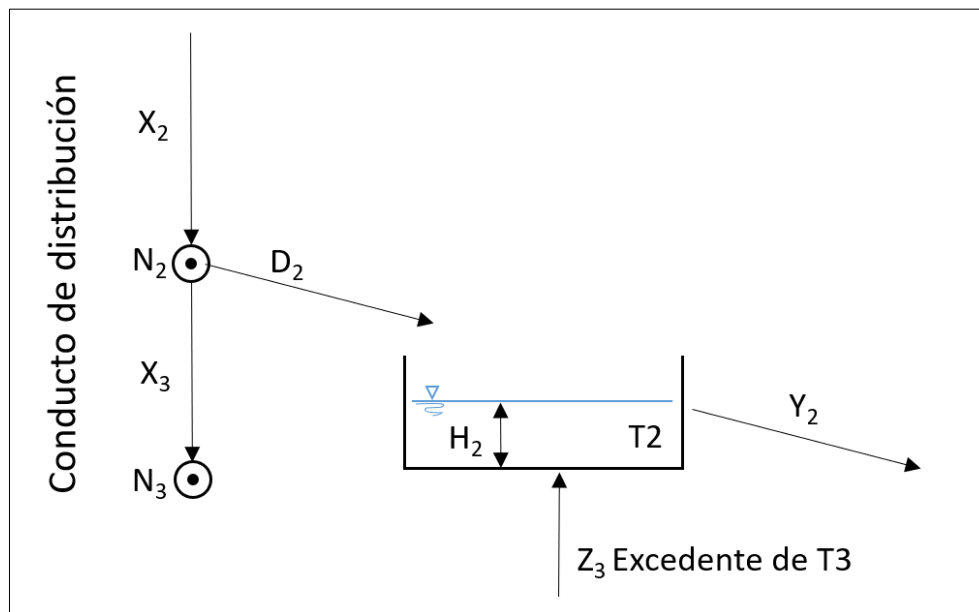


Figura 5. Esquema del tanque de almacenamiento superficial (T<sub>2</sub>).

Fuente: GIMHA (2021).

La escorrentía superficial en ladera puede generarse a partir de dos mecanismos principales. El primero es el mecanismo de Horton, que ocurre cuando el excedente del almacenamiento estático (X<sub>2</sub>) supera la capacidad de infiltración gravitacional (X<sub>3</sub>), impidiendo que el agua penetre en el suelo y favoreciendo su desplazamiento superficial. El segundo es el mecanismo de Dunne, que se presenta cuando el almacenamiento gravitacional del suelo alcanza su punto de saturación, forzando el flujo de agua desde el suelo hacia la superficie y contribuyendo al escurrimiento superficial. El balance de infiltración gravitacional se expresa mediante la ecuación:

$$X_3 = \text{mín}[X_2; \Delta t. k_s. FC_3]$$

Mediante balance, se calcula el agua que se deriva hacia el tanque de almacenamiento superficial (T<sub>2</sub>):

$$D2 = X2 - X3$$

Posteriormente se actualiza el estado del tanque incluyendo los aportes desde el tanque gravitacional (T3) mediante la siguiente expresión:

$$H2 = H2 + X2 - X3 + Z3$$

Finalmente se calcula el coeficiente de descarga ( $\alpha$ ) que está ligado a la ecuación de continuidad en el canal que representa el almacenamiento superficial. Este coeficiente de descarga está condicionado por el factor corrector FC4 tal como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + v \cdot FC4 \cdot \Delta t}$$

Respecto a la velocidad de flujo, este se calcula a partir de la pendiente mediante la siguiente expresión.

$$v_t = 1.4142 \cdot s_o^{0.5}$$

### 2.1.5. Tanque de almacenamiento gravitacional

El tanque de almacenamiento gravitacional representa la porción del suelo superior cuya capacidad de almacenamiento se encuentra entre la capacidad de campo y la saturación (Figura 6). En ese sentido, el agua gravitacional puede pasar a niveles inferiores mediante percolación, otro porcentaje podría generar interflujo y otra fracción, podría retornar a la superficie mediante el mecanismo de Dunne. Este tanque es clave en la dinámica del flujo subsuperficial, ya que regula la cantidad de agua disponible para la percolación y el interflujo.

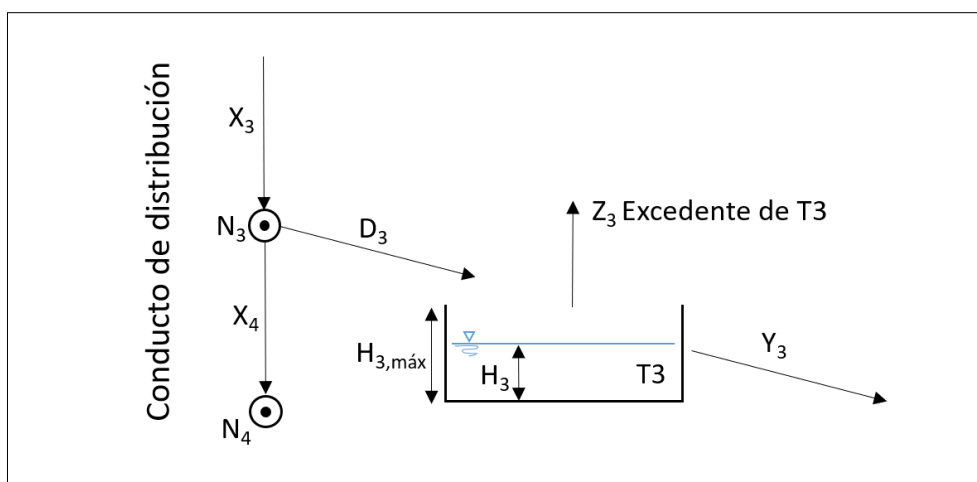


Figura 6. Esquema del tanque de almacenamiento gravitacional en la capa superior del suelo (T3).

Fuente: GIMHA (2021).

Las entradas de agua a este tanque están constituidas por la derivación hacia el tanque de almacenamiento gravitacional (D3) y el interflujo desde aguas arriba (Y3\*). Las salidas del tanque corresponden Al Excedente del tanque T3 (Z3) y el interflujo (Y3). En el modelo Tetis, se asume que, en condiciones de estado cuasi-saturado, la velocidad

de percolación es equivalente a la capacidad de percolación ( $K_p$ ), la cual puede estimarse a partir de la conductividad hidráulica vertical del suelo inferior o de la roca madre. La percolación se modela mediante la siguiente ecuación e incluye un factor corrector (FC5):

$$X_4 = \text{mín}[X_3; \Delta t \cdot k_p \cdot FC5]$$

Se calcula el estado actual del tanque de almacenamiento T3 mediante la siguiente ecuación:

$$H_3 = \text{mín}[H_3 + X_3 - X_4; H_3, \text{max}]$$

Cuando la capacidad máxima del tanque de almacenamiento gravitacional es superada, este excedente genera el flujo Z3 que finalmente se agrega al tanque T2. El cálculo del excedente es el siguiente:

$$Z_3 = \text{máx}[0.0, H_3 + X_3 - X_4 - H_3, \text{max}]$$

Por otro lado, el tanque también libera agua a través del interflujo ( $Y_3$ ), que corresponde al movimiento lateral del agua dentro del suelo. La velocidad del interflujo es equivalente a la conductividad hidráulica del interflujo ( $k_{ss}$ ), la cual representa la capacidad del suelo para transmitir agua en dirección horizontal. El interflujo se modela como una descarga de tipo embalse lineal con velocidad constante, según la expresión que integra un factor corrector (FC6):

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + FC6 \cdot k_{ss} \cdot \Delta t}$$

$$Y_3 = \alpha \cdot H_3$$

#### 2.1.6. Tanque de almacenamiento subterráneo

El cuarto tanque de almacenamiento (T4) representa al acuífero (Figura 7). Las entradas al tanque están constituidas por la derivación hacia el tanque de almacenamiento subterráneo ( $D_4$ ) y el flujo subterráneo de aguas arriba ( $Y_4^*$ ). Las salidas del tanque corresponden al flujo base ( $Y_4$ , conectado), mientras que el balance en el nodo N4 cuantifica el flujo profundo ( $X_5$ , flujo subterráneo no conectado). En Tetis se hace la aproximación del flujo subterráneo mediante el modelo unicelular (embalse lineal), el cual se calcula a partir la capacidad de pérdidas del acuífero profundo ( $k_{ps}$ ).

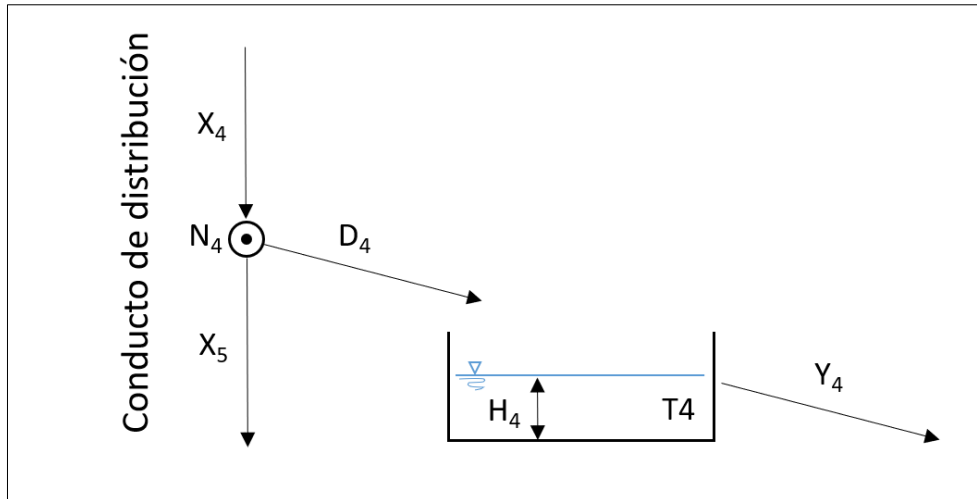


Figura 7. Esquema del tanque de almacenamiento subterráneo en la capa inferior del suelo (T3).

Fuente: GIMHA (2021).

La pérdida subterránea se calcula mediante la siguiente expresión que incluye el factor de corrección FC7.

$$X5 = \text{mín}[X4; kps. \Delta t. FC7]$$

En ese sentido, el flujo de salida del tanque subterráneo (Y4) se calcula a partir de la conductividad hidráulica del acuífero saturado ( $k_{sa}$ ) de la siguiente manera:

$$Y4 = \alpha. H4$$

Donde el coeficiente  $\alpha$  se calcula mediante la siguiente expresión que incluye el factor corrector FC8.

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + FC8. k_{sa}. \Delta t}$$

### 2.1.7. Transferencia horizontal

La transferencia horizontal en el modelo hidrológico considera los flujos de agua que se trasladan lateralmente entre celdas, afectando los diferentes tanques de almacenamiento. Como se ha detallado en los apartados anteriores, los tanques de almacenamiento gravitacional (T3), almacenamiento subterráneo (T4), y en adición, el almacenamiento en cauces (T5), poseen flujos de entrada procedentes de celdas aguas arriba.

Es importante diferenciar entre cárcavas y cauces en el proceso de transferencia horizontal. Los cauces poseen un área de captación igual o mayor que las cárcavas, lo que podría implicar una mayor capacidad para recibir y transportar flujos de agua a lo largo del sistema de drenaje. Ambos tanques reciben aportes desde los tanques de almacenamiento superficial (T2) y gravitacional (T3); sin embargo, solo los cauces reciben contribuciones adicionales desde tanque de almacenamiento subterráneo (T4).

### **2.1.8. Onda cinemática geomorfológica**

La Onda Cinemática Geomorfológica (OCG) es una metodología que permite analizar la propagación de la escorrentía en el modelo TETIS. Esta se basa en la Onda Cinemática, una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant en la que se desprecia tanto el término inercial como el término de presión. El enfoque de la OCG emplea parámetros derivados directamente de la geomorfología de la cuenca analizada. Este enfoque presenta las siguientes hipótesis, según GIMHA (2021):

- Se basa en el principio de la conservación de la masa.
- La pendiente de la línea de energía es aproximadamente equivalente a la pendiente del terreno.
- Las aceleraciones son despreciables en todos los elementos de la red de cauces, salvo en aquellos puntos donde, de forma local, la velocidad o las deformaciones del cauce generan una resistencia al flujo comparable a la fuerza de gravedad.
- La resistencia al flujo es depende del radio hidráulico, rugosidad del cauce y la velocidad.
- La velocidad de flujo se ajusta hasta alcanzar una nueva forma donde la resistencia al flujo es similar a la acción de la gravedad.
- Dado que se considera una condición de cuasi-equilibrio, la velocidad puede calcularse mediante expresiones empíricas como las fórmulas de Chezy o Manning.
- La geometría del cauce está determinada por el entorno geomorfológico, el área de drenaje y el caudal.
- El coeficiente de rugosidad se puede estimarse en función al tamaño característico de los sedimentos, aplicando expresiones como la de Strickler, Limerinos, entre otras.
- A cada celda de la discretización de la cuenca le corresponde un elemento de la red de drenaje.

### **2.2. Submodelo de sedimentos**

El módulo de sedimentos de TETIS (Montoya, 2008) es un modelo unidimensional basado en el modelo CASC2D-SED adaptado por Rojas (2002, como se cita en GIMHA, 2021), el cual corresponde un modelo bidimensional que incluye procesos de transporte de sedimentos en ladera (considerando una aproximación bidimensional) y canales (considerando una aproximación unidimensional).

Los procesos de generación, transporte y deposición de sedimentos están condicionados por dos factores principales: la cantidad de sedimento disponible en la cuenca (ladera y canales) y la capacidad de transporte del flujo. El movimiento de las partículas más finas está gobernado por la disponibilidad de sedimentos, mientras que el desplazamiento de partículas de mayor tamaño (partículas más gruesas), depende

de la capacidad que tiene la corriente de agua para su transporte (Julien, 1995, como se cita en GIMHA, 2021). La dinámica entre el tamaño del grano y la capacidad de transporte se presenta en la Figura 8.

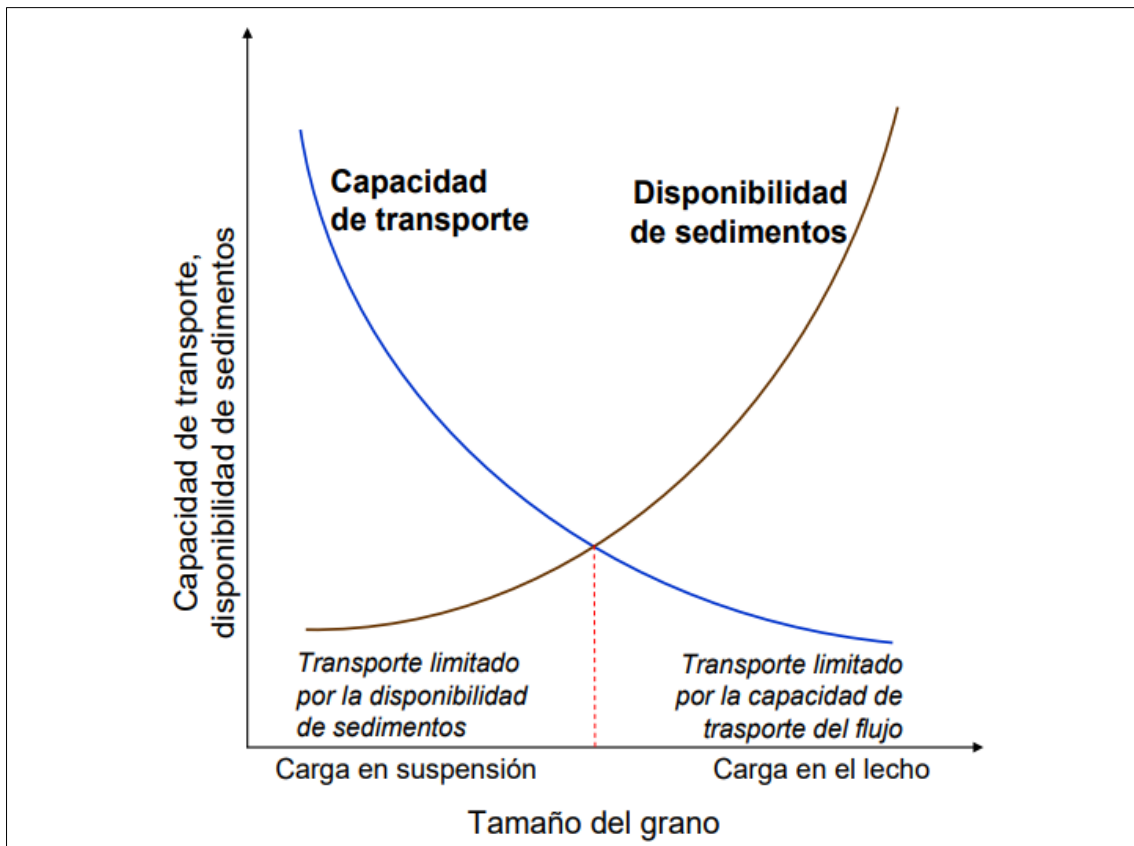


Figura 8. Curva de suministro y capacidad de transporte de la corriente.

Fuente: Julien (1995), como se cita en GIMHA (2021).

Las partículas del sedimento se clasifican, según su tamaño o textura, en tres categorías: arena, limo y arcilla. La velocidad necesaria para poner en movimiento una partícula depende directamente de su tamaño (citado en GIMHA, 2021). Asimismo, las características físicas consideradas en TETIS se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tamaño medio del grano y velocidad media de sedimentación en TETIS

Clase	Diámetro (mm)	Velocidad (mm/s)
Arena	0.350	36
Limo	0.016	0.22
Arcilla	0.001	0.00086

Fuente: GIMHA (2021).

### 2.2.1. Proceso de transporte en ladera

El submodelo de sedimentos en TETIS se basa en la ecuación de Kilinc y Richardson modificada de transporte propuesta por Julien (1995, como se cita en GIMHA, 2021) que depende de la pendiente del terreno ( $S_0$ ), el caudal ( $Q$ ), el ancho del cauce ( $W$ ), los efectos del uso del suelo, prácticas de cultivo y características de los suelos. Es así como, el caudal unitario de sedimentos  $q_t$  expresado en (tons/m/s) producidos por un

caudal unitario de agua (caudal Q por unidad de ancho W), se calcula mediante la siguiente relación empírica:

$$q_t = 23210 * S_0^{1.66} * \left(\frac{Q}{W}\right)^{2.035} * \frac{K}{0.15} * C * P$$

Donde K es el factor de erosionabilidad del suelo, C es el factor del cultivo, P es el factor de prácticas de conservación de suelo según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos y la constante 23210 es una constante empírica. Asimismo, el denominador 0.15 es una constante que fue incorporado ya que la ecuación inicial fue desarrollada en arenas con suelo desnudo cuya erosionabilidad máxima es 0.15 según la USLE. Los procesos de ladera en TETIS se ilustran en la Figura 9.

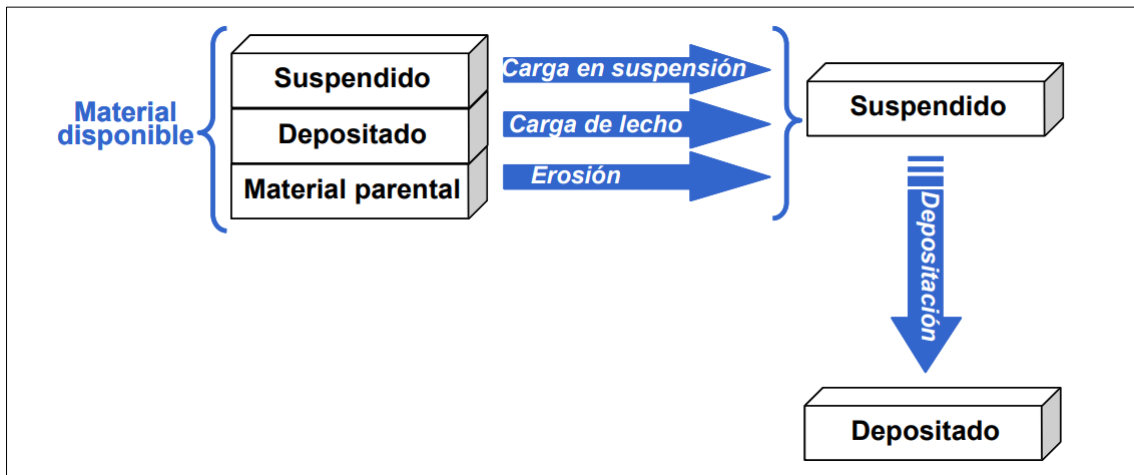


Figura 9. Esquema de los procesos de ladera en TETIS.

Fuente: GIMHA (2021).

Dentro del modelo TETIS, la capacidad de transporte disponible se asigna en primer lugar al desplazamiento de sedimentos en dirección aguas abajo, teniendo en cuenta la distribución de las distintas fracciones granulométricas, tanto en suspensión como material de lecho. Si tras este proceso aún persiste capacidad excedente de transporte, se activa la erosión del suelo, la cual se ejecuta en función del porcentaje que representa cada fracción de tamaño en el material.

### 2.2.2. Proceso de transporte en cárcavas y cauce

El Transporte de sedimentos en cárcavas y cauces es calculado mediante la ecuación de Engelund y Hansen (1967, como se cita en GIMHA, 2021). La ecuación emplea parámetros hidráulicos (radio hidráulico, velocidad del flujo y ángulo de fricción) además de las características de la partícula (gravedad específica y el diámetro). Es así como la concentración de sedimentos por peso ( $C_{wi}$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$C_{w_i} = 0.05 * \left(\frac{G}{G - 1}\right) * \frac{V * S_f}{\sqrt{(G - 1) * g * ds_i}} * \sqrt{\frac{R_h * S_f}{(G - 1) * ds_i}}$$

Donde:

- G: gravedad específica de los sedimentos.
- V: velocidad promedio del canal (m/s).
- S<sub>f</sub>: ángulo de fricción del canal (m/m).
- G: aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).
- ds<sub>i</sub>: diámetro de la fracción de tamaño *i* (m).
- R<sub>h</sub>: radio hidráulico del canal (m).

En ese sentido, el volumen de la fracción de sedimento de tamaño *i*, Q<sub>SEHi</sub>, que puede ser transportado por el flujo en un intervalo dt se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{SEHi} = \frac{Q * Cw_i * dt}{2.65}$$

Donde Q es el caudal líquido en el canal, expresado en m<sup>3</sup>/s.

El modelo implementa un esquema que distingue entre el transporte de sedimentos finos, considerados como carga en suspensión, y el de partículas más gruesas, asociadas al material del lecho. Esta distinción permite asignar diferentes capacidades de transporte y velocidades de sedimentación para cada clase granulométrica. Por otro lado, el modelo no incorpora explícitamente la erosión directa del material parental en el fondo o en las márgenes del canal. Esta simplificación es adecuada en muchas cuencas, ya que estudios previos han demostrado que, en numerosos casos, la mayor parte del sedimento transportado en los cauces proviene de depósitos sueltos acumulados por eventos de crecida anteriores, los cuales son más fácilmente removibles (Piest et al., 1975, como se cita en GIMHA, 2021). Sin embargo, en contextos donde la contribución del material parental al proceso erosivo es relevante, el modelo permite definir manualmente, como condición inicial, la presencia de depósitos de sedimentos disponibles para ser erosionados. El esquema de los procesos en cárcavas y cauces se representan en la Figura 10.

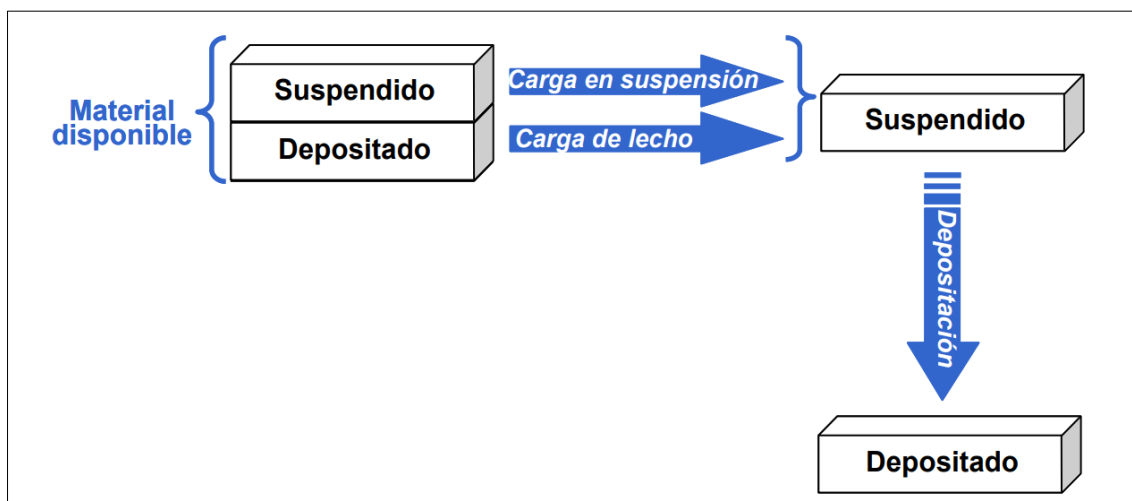


Figura 10. Esquema de los procesos de cárcavas y cauce en TETIS.

Fuente: GIMHA (2021).

### 2.2.3. Parámetros del submodelo de sedimentos

El submodelo de sedimentos en TETIS requiere información relativa a tres factores de la USLE (C, K y P), así como datos sobre la textura del suelo, expresada en porcentajes de arena, limo y arcilla. Estos seis mapas conforman el conjunto de parámetros necesarios para la simulación del modelo de sedimentos. No obstante, dada la elevada incertidumbre asociada a este tipo de información, sumada a la simplificación conceptual inherente al modelo implementado en TETIS, es fundamental incorporar factores correctores que permitan ajustar y calibrar adecuadamente la simulación sedimentológica.

La calibración del modelo de sedimentos en TETIS se lleva a cabo mediante el ajuste de tres factores correctores, los cuales permiten representar de manera más precisa los procesos de transporte de sedimentos en laderas, cauces principales y cárcavas. El primero de estos parámetros, denominado  $\alpha$ , actúa como un coeficiente multiplicativo aplicado a la versión modificada de la fórmula de Killinc y Richardson. Su función es compensar posibles errores en la estimación de los factores de la ecuación USLE, así como corregir las limitaciones asociadas al enfoque semiempírico adoptado en el modelo. La expresión ajustada del transporte en ladera se representa como.

$$q_t^* = \alpha * q_t$$

Donde  $q_t$  es el caudal sólido específico y  $\alpha$  el factor de ajuste correspondiente.

Por otro lado, los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se incorporan como coeficientes multiplicativos en la fórmula de Engelund y Hansen, con el fin de ajustar la modelación de los procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos que ocurren dentro de la red de drenaje (cauces y cárcavas). El factor corrector  $\beta_1$  se emplea específicamente para ajustar la capacidad de transporte en cárcavas, mientras que  $\beta_2$  se utiliza para los cauces.

$$Cw_i^* = \beta_1 * Cw_i$$

$$Cw_i^* = \beta_2 * Cw_i$$

### 2.2.4. Condiciones iniciales

El volumen de sedimentos generado durante un evento de crecida depende fuertemente de las condiciones iniciales de almacenamiento de sedimentos en la cuenca. Asimismo, la producción de sedimentos depende del desarrollo morfológico de la red de cauces y cárcavas, así como la estabilidad del material presente en el terreno.

El *gully cleanout* o efecto *bulldozer* se refiere a la rápida movilización de sedimentos previamente acumulados en cárcavas al inicio de eventos de lluvia intensos, antes de alcanzarse el pico de caudal líquido. Este fenómeno fue observado en una cuenca de Iowa (EE. UU.), donde lluvias concentradas en mayo y junio, tras periodos de acumulación de detritos, provocaban hasta el 80 % del transporte anual de sedimentos

(Piest et al., 1975, como se cita en GIMHA, 2021). Asimismo, en la cuenca de Vallcebre (Pirineo Oriental, España), se ha documentado que, aunque la principal fuente de sedimentos es la erosión de laderas en zonas de *badlands*, su transporte efectivo depende de la dinámica de cárcavas y cauces, condicionada por la estacionalidad. En verano, el material erosionado permanece retenido por falta de escorrentía, mientras que en invierno las lluvias más prolongadas activan la red de drenaje y movilizan esos sedimentos hacia aguas abajo. Este proceso se caracteriza por la aparición de un pico de sedimentos anterior al de caudal líquido, lo que refleja el papel crucial de las condiciones iniciales y la temporalidad en el transporte sedimentario.

Cuando se dispone de sedimentos sueltos susceptibles de ser erosionados al comienzo de una crecida, suele producirse un desfase entre el máximo de sedimento transportado y el máximo caudal de agua. Este comportamiento se representa mediante un bucle de histéresis en la curva que relaciona ambos caudales, y está condicionado por variables como la posición del punto de medición, la distribución de las zonas que generan sedimentos, la proporción de aportes desde laderas y cauces, así como por la intensidad de la lluvia. Por lo general, las primeras precipitaciones movilizan el material más expuesto en superficie, lo que provoca una reducción progresiva del sedimento disponible durante el evento y concentra el mayor transporte sólido en la fase inicial del ascenso del hidrograma (Thornes, 1980, como se cita en GIMHA, 2021).

#### **2.2.4.1. Histéresis**

La histéresis representa la relación no lineal existente entre el caudal líquido y el caudal sólido durante un evento de avenida, estando fuertemente influenciada por las condiciones iniciales. Esto implica que, para un mismo valor de caudal líquido, los valores de caudales sólidos pueden ser diferentes. Según la disponibilidad de sedimentos, se pueden presentar los siguientes casos de histéresis que relaciona el caudal líquido y sólido durante un evento de tormenta.

- Curva única: no se presenta efectos de histéresis. La disponibilidad de sedimentos es ilimitada, de esta manera el caudal sólido incrementa progresivamente con el incremento del caudal líquido. El transporte depende solo de la energía del flujo (Figura 11).

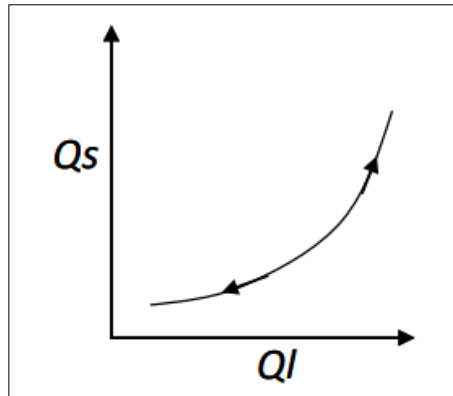


Figura 11. Curva única.  
Fuente: GIMHA (2021).

- Bucle sentido antihorario: se presenta efectos de histéresis, se desarrolla un bucle cerrado que avanza en sentido antihorario. La disponibilidad de sedimentos es limitada, con suministro de sedimentos retrasados por alguna razón, o el caudal sólido tiene tiempo de tránsito diferente al caudal líquido (Figura 12).

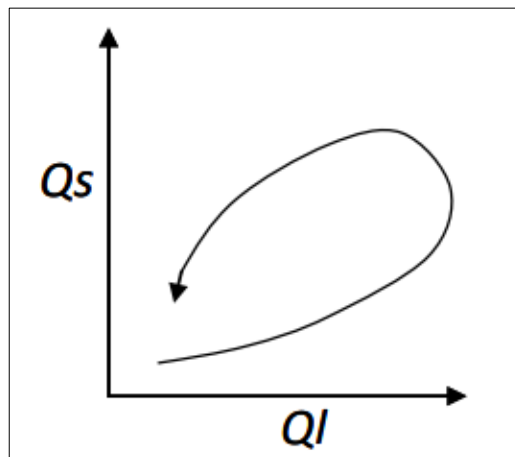


Figura 12. Bucle sentido antihorario.  
Fuente: GIMHA (2021).

- Bucle sentido horario: se presenta efectos de histéresis, se desarrolla un bucle cerrado que avanza en sentido horario. La disponibilidad de sedimentos es limitada y decreciente, es decir que a medida que avanza el evento, esta disponibilidad disminuye, por lo que el caudal sólido decrece durante la fase descendente, incluso si el caudal líquido es similar (Figura 13).

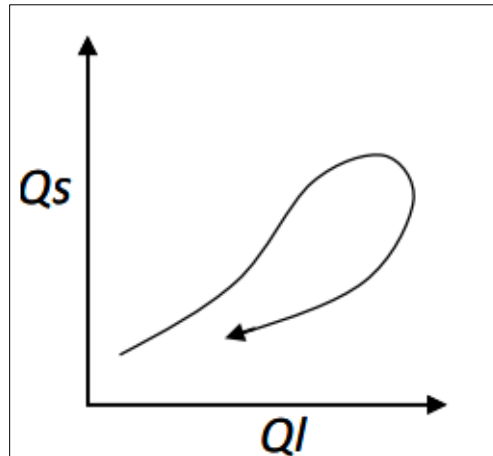


Figura 13. Bucle sentido horario.

Fuente: GIMHA (2021).

- Bucle con forma de ocho: se presenta efectos de histéresis. Se presenta una disminución inicial en la disponibilidad de sedimentos, seguida de una nueva fuente o incremento hacia el final del evento. Esto puede deberse a cambios en las áreas activas de generación de sedimentos o a la activación de nuevas fuentes (Figura 14).

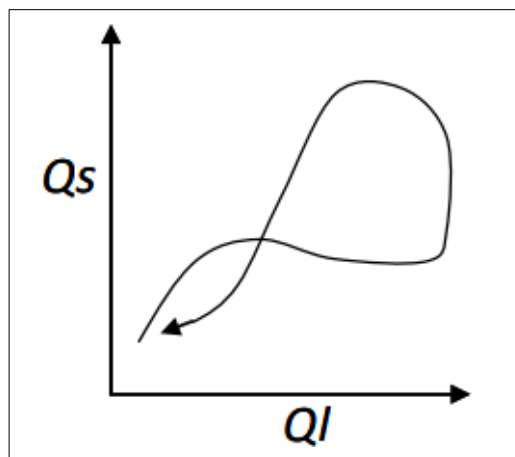


Figura 14. Bucle en forma de ocho.

Fuente: GIMHA (2021).

- Bucle amplio: se presenta efectos de histéresis. Similar al bucle horario, pero con un lazo más abierto o ancho. Representa un mayor descenso en la disponibilidad de sedimentos a lo largo del evento. El ancho del bucle es depende de la magnitud de esa disminución (Figura 15).

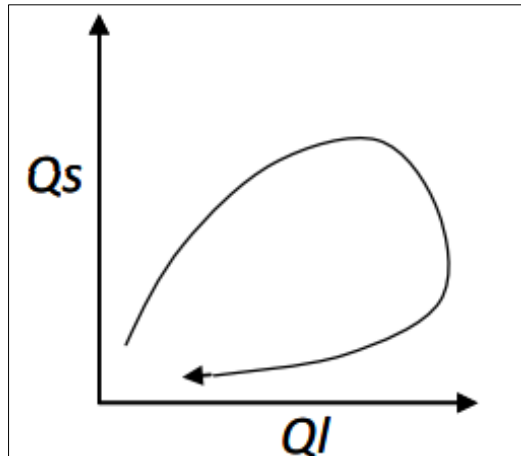


Figura 15. Bucle más amplio.

Fuente: GIMHA (2021).

- **Casual:** Se observa una curva irregular, con picos que no guardan correlación directa con el caudal líquido. Existen aportes de sedimentos que no coinciden con los momentos de mayor flujo de agua y son causados por eventos aislados impredecibles (Figura 16).

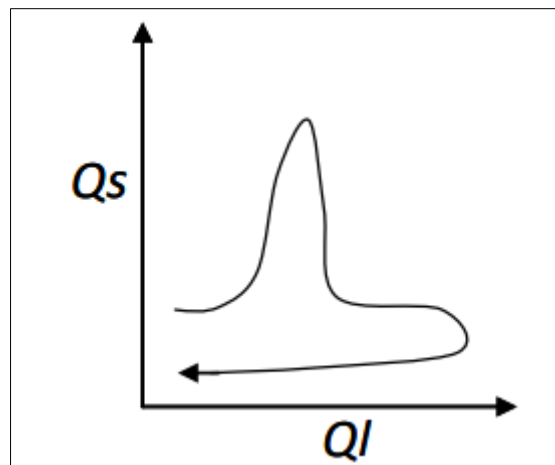


Figura 16. Casual.

Fuente: GIMHA (2021).

- **Bucle y curva única:** al comienzo del evento, hay una limitación en el suministro de sedimentos. Sin embargo, al superar cierto umbral de caudal ( $Q$ ), se activa una fuente ilimitada de sedimentos, por lo que el comportamiento se asemeja al de una curva única (Figura 17).

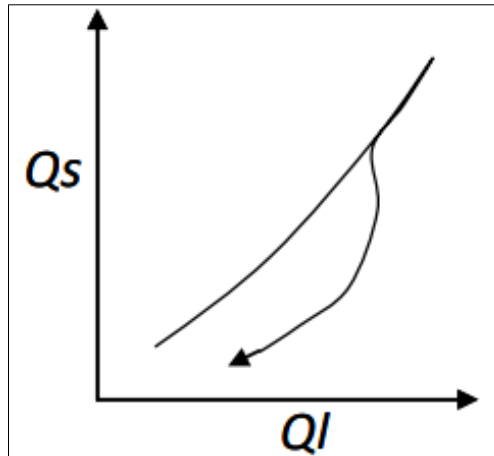


Figura 17. Bucle y curva única.  
Fuente: GIMHA (2021).

### 2.3. Submodelo de sedimentación en azudes

El proceso de sedimentación en pequeños azudes está representado en el modelo hidrológico distribuido TETIS a través del submódulo STEP, cuyas siglas corresponden a *Sediment Trap Efficiency for Small Ponds* (eficiencia de atrapamiento de sedimentos para pequeños embalses). Este submódulo se basa en el modelo conceptual propuesto por Verstraeten & Poesen (2001), específicamente diseñado para estimar la eficiencia de retención de sedimentos en estructuras hidráulicas de pequeña escala como los azudes.

El modelo STEP ha sido desarrollado para simular la acumulación progresiva de sedimentos y calcular su eficiencia de atrapamiento en periodos continuos y prolongados de simulación, lo cual resulta particularmente relevante en el contexto de estudios hidro-sedimentológicos de largo plazo. Una de las principales ventajas de este submódulo es su simplicidad conceptual y operativa, que permite una implementación eficiente desde el punto de vista computacional sin comprometer significativamente la precisión de resultados (Verstraeten & Poesen, 2000).

#### 2.3.1. Balance líquido

El modelo STEP divide al reservorio en n-compartimentos de igual área que permite estudiar la distribución espacial de sedimentos depositados, así como facilitar los cálculos computacionales. La ecuación de la continuidad es empleada para cambiar el volumen de agua en el azud.

$$V_{(i)} = V_{(i-1)} + \frac{Q_{in(i)} + Q_{in(i-1)}}{2} \Delta t - \frac{Q_{out(i)} + Q_{out(i-1)}}{2} \Delta t$$

Donde:

- V: es el volumen del azud
- $Q_{in}$ : es el caudal de entrada
- $Q_{out}$ : es el caudal de salida

- $\Delta t$ : es el paso de tiempo considerado.

Asimismo, el subíndice (i) indica el tiempo actual, mientras que el (i-1) hace referencia al paso de tiempo anterior. Esta ecuación se utiliza para modelar el cambio en el nivel del agua cerca a la salida del azud ( $hw$ ). Además, el modelo contempla la posible existencia de una pendiente en el fondo del estanque, de modo que el nivel del fondo puede ser más elevado en la zona de salida respecto a la entrada. Esta configuración da lugar a una distribución no uniforme del nivel del agua a lo largo del azud, especialmente si se considera una discretización de este en (n) compartimentos. En este esquema, el compartimento 1 se ubica cerca de la entrada, mientras que el compartimento "n" se localiza junto a la salida (Figura 18).

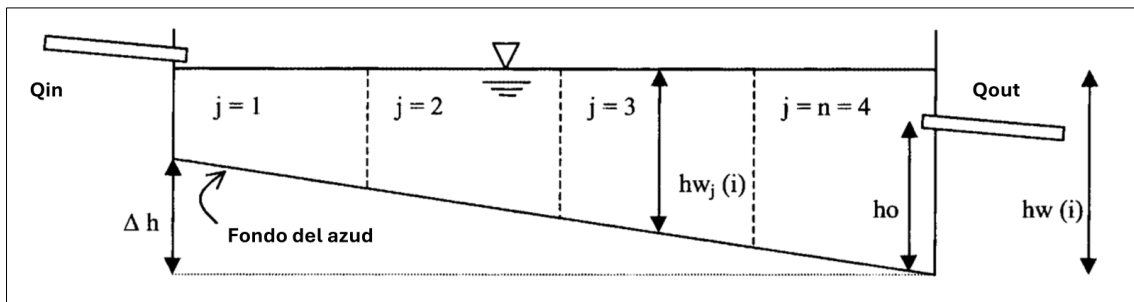


Figura 18. Sección transversal de un azud dividido en cámaras de áreas equivalentes.

Fuente: Adaptado de Verstraeten & Poesen (2001).

Como se presenta en la Figura 18, la profundidad en zonas cercanas a la salida es mayor a las zonas cercanas a la entrada, por ello, el nivel de agua en cada compartimento puede variar de la siguiente manera:

$$hw_{j(i)} = hw_{(i)} + \Delta h \left( \frac{n - j + 0.5}{n} \right)$$

Donde  $hw_{j(i)}$  es el nivel medio del agua en el compartimento j,  $\Delta h$  es la diferencia de altura entre la entrada y la salida y "n", es el número de compartimentos. La variabilidad espacial de los niveles de agua implica que en algunos casos la cantidad de cámaras cercanas a la entrada se encuentren particularmente secas por lo que la sedimentación no es posible. No obstante, durante un evento de entrada de caudal, estos compartimentos inicialmente secos pueden alcanzar un cierto nivel de agua que favorece la deposición de sedimentos. Por ello, el modelo corrige el nivel del agua en todos los compartimentos durante estos periodos de aportación. En particular, el volumen de agua en un compartimento seco se calcula como  $1/n$  del volumen de entrada durante el paso de tiempo anterior. Para conservar el balance de masas, el volumen de agua en los demás compartimentos debe ajustarse, lo que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_{(i),corregido} = V_{(i)} + n_e \left( \frac{\Delta V_{(i)}}{n} \right)$$

Donde:

- $V_{(i),\text{corregido}}$ : es el volumen corregido en los compartimentos que no están secos
- $ne$ : es el número de cámaras vacías en el paso de tiempo previo (Figura 19).

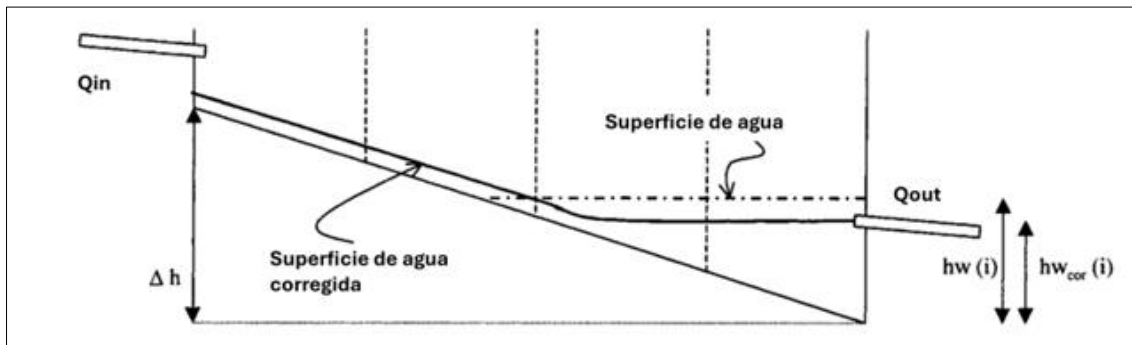


Figura 19. Modificación del nivel de agua en caso de compartimentos vacíos.

Fuente: Adaptado de Verstraeten & Poesen (2001).

### 2.3.2. Balance de sedimentos

La ecuación de balance empleado para cada compartimento es la siguiente:

$$\frac{dV^j C^j}{dt} = Q_{in}^j C(t)_{in}^j - Q_{out}^j C(t)^j - S_d(t)^j$$

Donde  $C^j$  representa la concentración de sedimentos en el compartimento  $j$ ,  $V_j$  el volumen de agua en el compartimento y  $S_d^j$  representa la tasa de sedimentación en el compartimento. Dentro de cada compartimento se asume una mezcla completa de agua y sedimentos, sin considerar estratificación vertical. Esta suposición puede considerarse razonable en sistemas de pequeño tamaño como los estanques o azudes de baja capacidad. Una simplificación adicional del modelo STEP se encuentra en la forma en que se calcula la deposición de sedimentos. STEP utiliza un enfoque básico de decantación, representado por la siguiente expresión:

$$S_j^d = V^j C^j \frac{v_s}{hw_j} \Delta t$$

Donde  $v_s$  es la velocidad de sedimentación de las partículas y  $hw_j$  el nivel del agua en el compartimento  $j$ . No obstante, el modelo ofrece la opción de considerar los efectos de turbulencia, el cual está integrado en TETIS y permite un enfoque más realista ya que se considera la eficiencia de asentamiento de partículas a efecto de la turbulencia (C. N. Chen, 1975).

$$S_j^d = V^j C^j \left( 1 - e^{\left( 1 - \frac{v_s}{hw_j} \Delta t \right)} \right)$$

La velocidad de sedimentación de las partículas se estima mediante la propuesta de Dietrich (1982) que permite incluir las propiedades tales como el diámetro, redondez y forma de las partículas. Esto quiere decir que, mientras se tenga información sobre las clases texturales, sus propiedades y el porcentaje de masa de cada clase textural, el balance de masa de sedimentos puede realizarse. La masa de sedimentos que se

transfiere de un compartimento a otro se calcula de la siguiente manera, considerando que el caudal de salida de cada compartimento  $j$  puede ser diferente:

$$V_{j \rightarrow j+1} = \left(\frac{n-j}{n}\right) Q_{in} \Delta t + \left(\frac{j}{n}\right) Q_e \Delta t$$

Multiplicando esta ecuación por la concentración de sedimentos en el compartimento ( $j$ ), se obtiene la masa de sedimentos que entra al compartimento ( $j+1$ ). No obstante, tanto la masa de sedimentos depositada como la masa que sale de cada compartimento deben corregirse, ya que el sedimento que ha sido depositado no puede transferirse al siguiente compartimento, y viceversa. Por tanto, los valores calculados para las masas de sedimento depositado y saliente se reducen considerando dos factores clave: (i) la profundidad crítica del agua para que ocurra deposición ( $hw_{cr}$ ) y (ii) el cociente entre el volumen de agua transmitido y el volumen real de agua presente en el compartimento. La profundidad crítica se define como la profundidad a la cual la eficiencia de atrapamiento de sedimentos alcanza el 100% durante un paso de tiempo bajo condiciones no turbulentas. Esta profundidad es diferente para cada clase textural se calcula de la siguiente manera:

$$hw_{cr} = v_s \Delta t$$

Sin embargo, en casos de turbulencia, la profundidad crítica es infinitamente alta. Por este motivo, se considera que la profundidad crítica es aquella requerida para que el 99% de partículas se deposite y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$hw_{cr} = \frac{v_s \Delta t}{5.6052}$$

De este modo, la masa de sedimentos depositados y el efluente de sedimentos son reducidos por la misma cantidad de sedimentos (Figura 20):

$$S_j^d = V^j C^j \left(1 - e^{\left(1 - \frac{v_s \Delta t}{hw_j}\right)}\right) - \frac{hw_{cr,j} V^{j \rightarrow j+1} C^j}{11.2104 hw_j}$$

$$Q_e^j C^j = V^{j \rightarrow j+1} C^j - \frac{hw_{cr,j} V^{j \rightarrow j+1} C^j}{11.2104 hw_j}$$

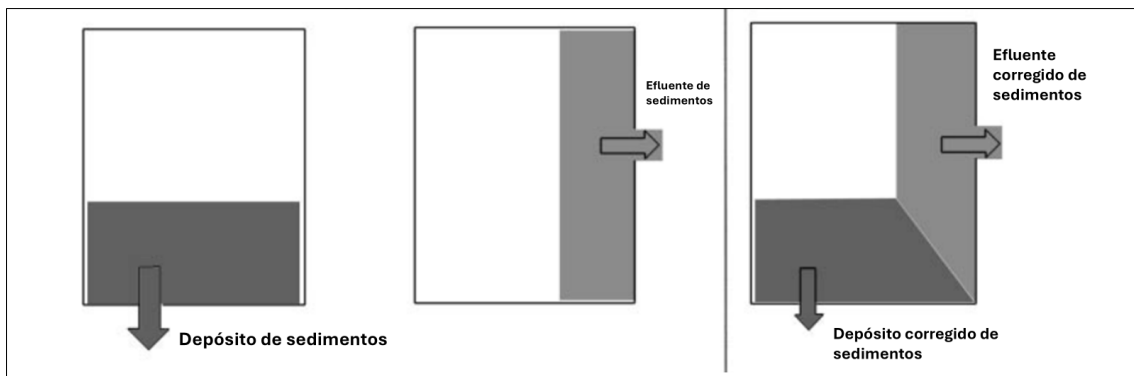


Figura 20. Modificación de la masa de sedimentos transportados a compartimentos.

Fuente: Adaptado de Verstraeten & Poesen (2001).

Finalmente, el modelo STEP predice la concentración de sedimentos en el efluente de salida del azud, asimismo, la eficiencia de atrapamiento de sedimentos (STE), se calcula comparando la masa de sedimentos en la entrada y salida del azud de la siguiente manera:

$$STE = 100 \left( 1 - \frac{\sum Q_{out} C^n \Delta t}{\sum Q_{in} C^1_{in} \Delta t} \right)$$

### 3. Caso de estudio

El ámbito de análisis para la implementación del modelo hidro-sedimentológico corresponde a las cuencas de L'Horta Sud, conformadas por la Rambla del Poyo, el Barranco de Picassent y el Barranco de Pozalet, ubicadas en la Comunidad Valenciana, al este de España, tal como se muestra en la Figura 21.

Las cuencas y subcuencas delimitadas se asocian a los sistemas fluviales principales que tuvieron una notable relevancia durante la riada de 2024, constituyendo, además, áreas drenantes de interés para la calibración y validación de los modelos implementados. Las unidades hidrográficas diferenciadas son:

- Cuenca Rambla del Poyo.
- Cuenca Rambla del Poyo hasta el sensor.
- Subcuenca del Barranco de Gallego.
- Subcuenca del Barranco de La Horteta.
- Cuenca del Barranco de Picassent.
- Cuenca del Barranco de Pozalet.

La cuenca Rambla del Poyo se origina en las estribaciones de las sierras de los Bosques y la Cabrera, a altitudes de 1023 m s.n.m. y 916 m s.n.m., respectivamente. Su red hidrográfica en la cabecera está conformada por tres sistemas principales: el Barranco Grande, el Barranco de la Cueva Morica y la Rambla de Gallo-Chiva. La confluencia de estos cursos se sitúa en las proximidades de la localidad de Cheste, donde el sistema pasa a denominarse Rambla del Poyo, la cual desemboca finalmente en la Albufera (Camarasa Belmonte, 1990).

El área drenante de la estación marco Rambla del Poyo constituye el ámbito de referencia para la calibración y validación del modelo con información sistemática. Esta subcuenca tiene una superficie aproximada de 182 km<sup>2</sup> y se origina en las sierras de los Bosques y La Cabrera, finalizando en la autovía A-3, donde se localiza el sensor de la estación de aforo. En la cabecera de la cuenca, los barrancos se desarrollan sobre formaciones calcáreas y presentan un marcado encajonamiento. Tras la confluencia de los colectores principales, el cauce se ensancha y describe meandros de gran radio de curvatura, adoptando una morfología trenzada como resultado de las elevadas pendientes, la abundante carga de fondo y el régimen de circulación (Camarasa Belmonte, 1990).

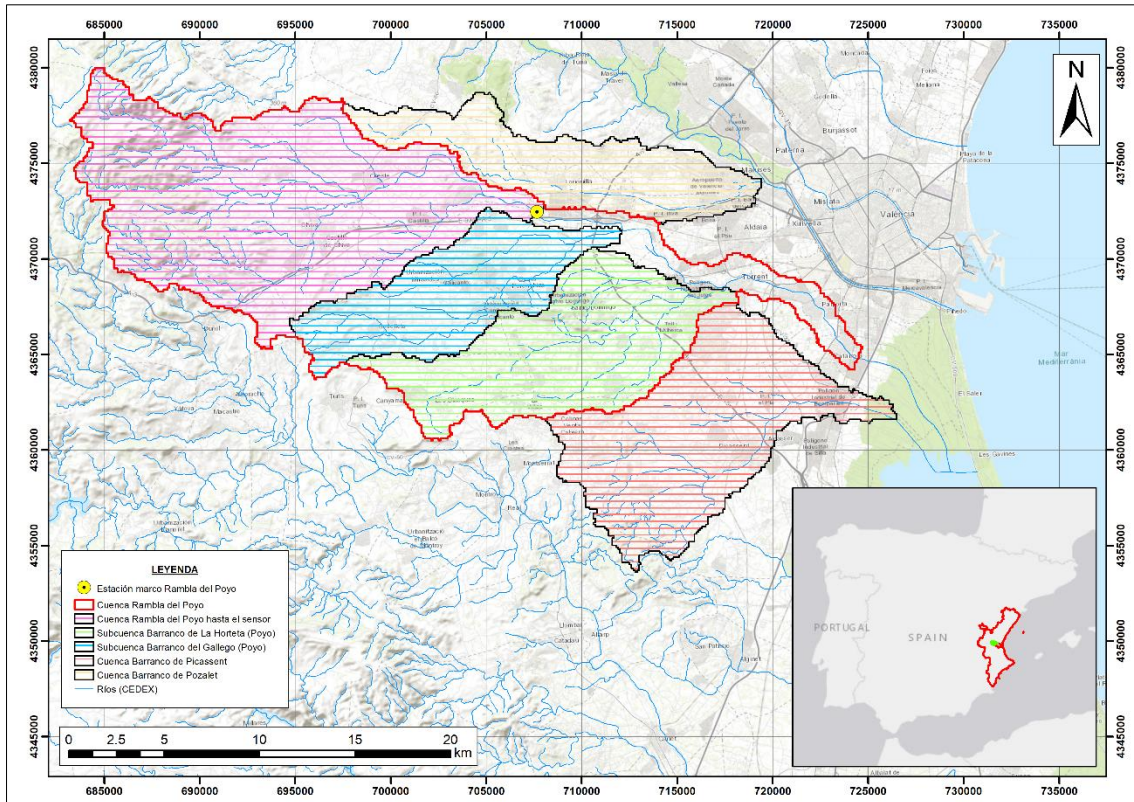


Figura 21. Cuencas de L’Horta Sud.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Parámetros del modelo hidrológico

Los mapas de parámetros del modelo hidrológico fueron proporcionados por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) y corresponde a la versión de mapas de parámetros del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente – TYPASA (IIAMA-TYPASA). Dichos mapas cuentan con una resolución espacial de 100 metros y abarcan una extensión que incluye la cuenca Rambla del Poyo, Barranco de Pozalet y el Barranco de Picassent. El ámbito de calibración y validación con información sistemática corresponde al área de drenaje de la estación marco Rambla del Poyo. No obstante, en el presente estudio se han definido diversos puntos de control hidrológico, a partir de los cuales se obtuvieron resultados específicos que permiten analizar los caudales asociados a la DANA 2024 en distintas localizaciones dentro de las cuencas de L’Horta Sud.

La delimitación del área de estudio se realizó mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de definir con precisión la superficie drenante asociada al punto de control de la estación de aforo de la Rambla del Poyo, además de identificar las subcuencas asociadas a los barrancos de análisis. Las cuencas de L’Horta Sud se desarrollan en dirección oeste a este como se aprecia en la Figura 22.

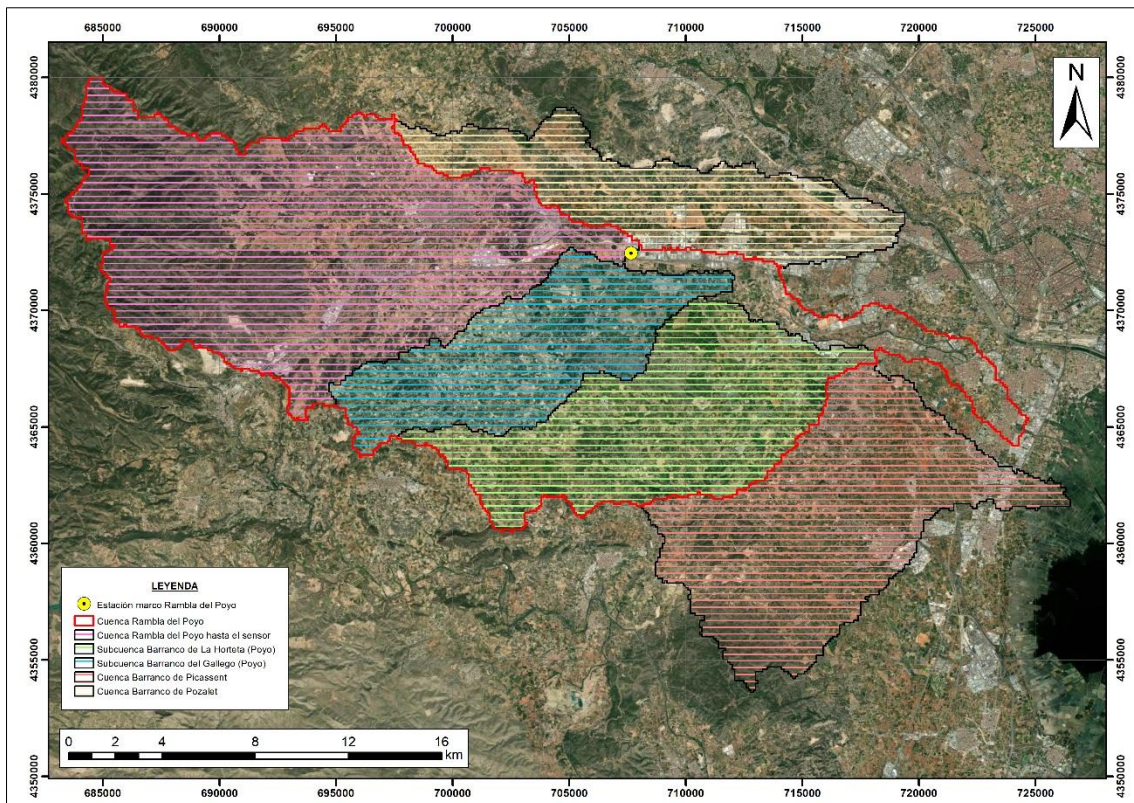


Figura 22. Área drenante de la estación Rambla del Poyo.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1. Modelo de elevación digital

En la Figura 23 se presenta el MED utilizado como base para llevar a cabo el modelado hidrológico. Asimismo, en la Tabla 2 se presentan los estadísticos descriptivos para cada subcuenca identificada en el ámbito de estudio. Las mayores elevaciones se presentan al oeste del área de estudio, alcanzando máximos de hasta 1008 m.s.n.m., mientras que las altitudes más bajas corresponden a las zonas cercanas a La Albufera. Cabe destacar que algunos valores registrados por debajo del nivel del mar no representan medidas reales del terreno; ya que estos valores son el resultado de un proceso de posprocesamiento del ráster conocido como quemado del ráster (*stream burning*, por sus siglas en inglés). Esta técnica, consiste en modificar el MED para mejorar la representación y continuidad de la red hídrica generada mediante Sistemas de Información Geográfica, lo que garantiza una mayor precisión en la identificación y caracterización de los cauces (Q. Chen et al., 2024). En este caso el quemado del ráster fue realizado por TYPESA y se encuentra entorno a los cauces con un valor de 210 metros.

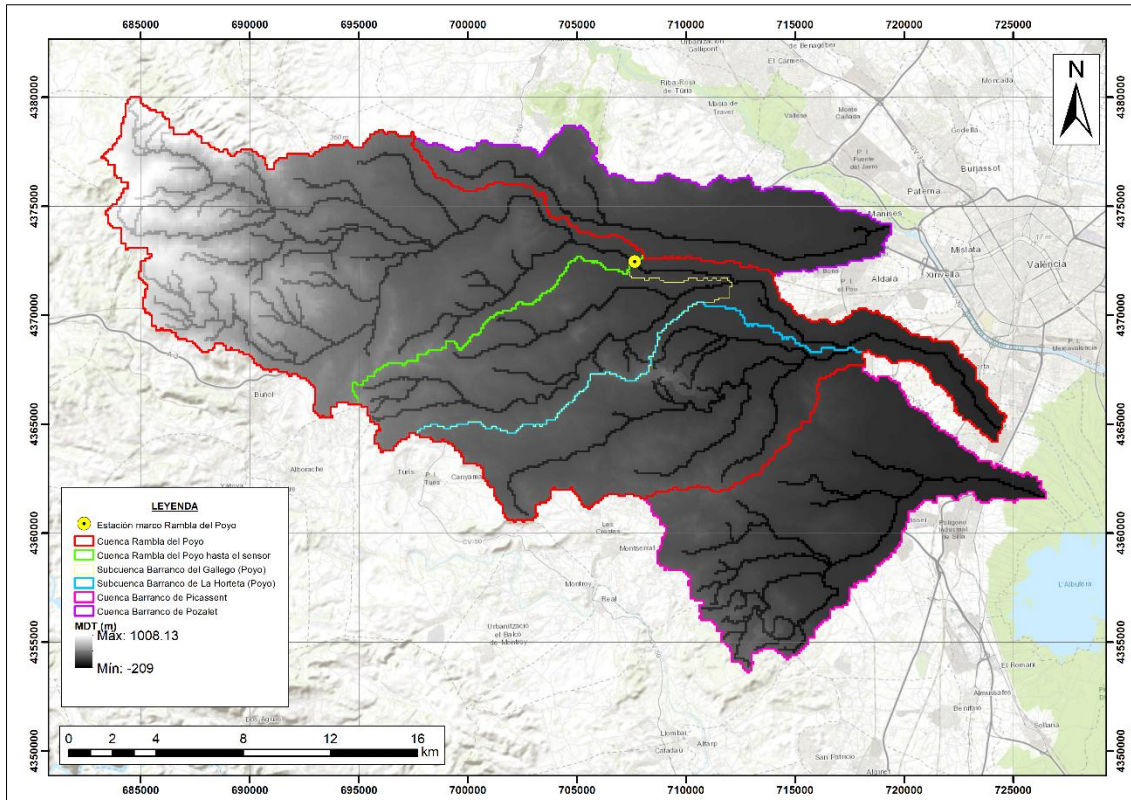


Figura 23. Modelo de elevación digital del ámbito del estudio.

Fuente: Elaboración propia con el MDT de TYP SA.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del MDT (m).

Estadístico	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Cuenca Rambla del Poyo	6.0	1008.1	264.9	217.8
Cuenca Rambla del Poyo hasta sensor	111.0	1008.1	395.3	341.6
Subcuenca Barranco de La Horteta (Poyo)	35.0	350.3	134.1	144.2
Cuenca Barranco de Picassent	1.0	297.7	76.8	74.0
Subcuenca Barranco del Gallego (Poyo)	81.0	447.3	187.1	195.3
Cuenca Barranco de Pozalet	35.0	290.9	113.8	104.9

Fuente: Elaboración propia con el MDT de TYP SA

A partir del modelo de elevación digital se obtuvieron sus derivados que corresponden a también corresponden a parámetros del modelo hidrológico en TETIS. Los mencionados ráster corresponden al de celdas acumuladas, dirección de flujo, pendiente y velocidad en ladera.

### 3.1.1.1. Velocidad en ladera

La velocidad en ladera ( $v_t$ ) fue estimada a partir del mapa de pendientes ( $S_0$ ), expresado en metro por metro (m/m). La distribución espacial de la  $v_t$  en las cuencas de L'Horta Sud se representa en la Figura 24, mientras que en la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos. La relación entre velocidad y pendiente es la siguiente:

$$v = 1.4142 \sqrt{S_0}$$

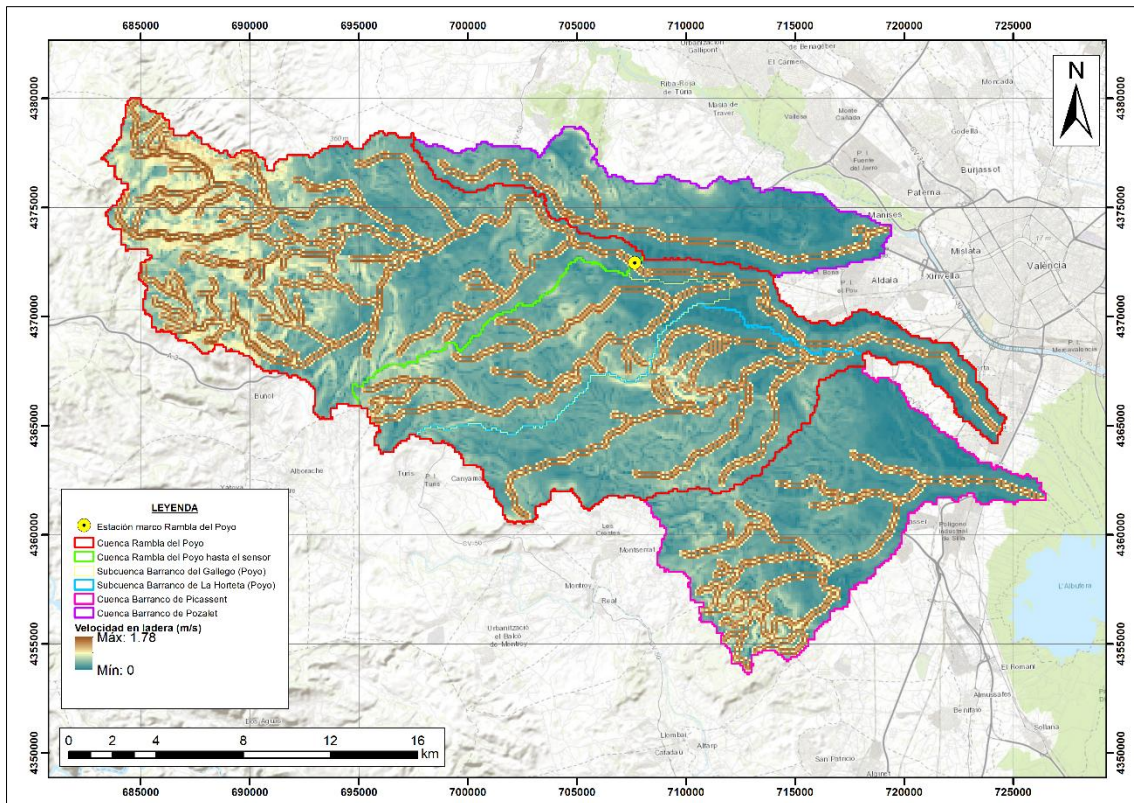


Figura 24. Velocidad en ladera (m/s) en el ámbito de estudio.

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPESA.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la velocidad de ladera (m/s).

Estadístico	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Cuenca Rambla del Poyo	0.000	1.777	0.621	0.408
Cuenca Rambla del Poyo hasta sensor	0.036	1.777	0.712	0.555
Subcuenca Barranco de La Horteta (Poyo)	0.043	1.637	0.521	0.346
Cuenca Barranco de Picassent	0.000	1.582	0.493	0.300
Subcuenca Barranco del Gallego (Poyo)	0.026	1.618	0.582	0.383
Cuenca Barranco de Pozalet	0.036	1.577	0.398	0.257

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPESA

### 3.1.2. Parámetros relacionados al suelo

En la Figura 25 se presenta la distribución espacial del almacenamiento estático, expresado en milímetros, en las cuencas de L'Horta Sud, mientras que en la Tabla 4 se presentan sus estadísticos descriptivos. Los valores más altos están localizados predominantemente en zonas bajas de las cuencas de análisis.

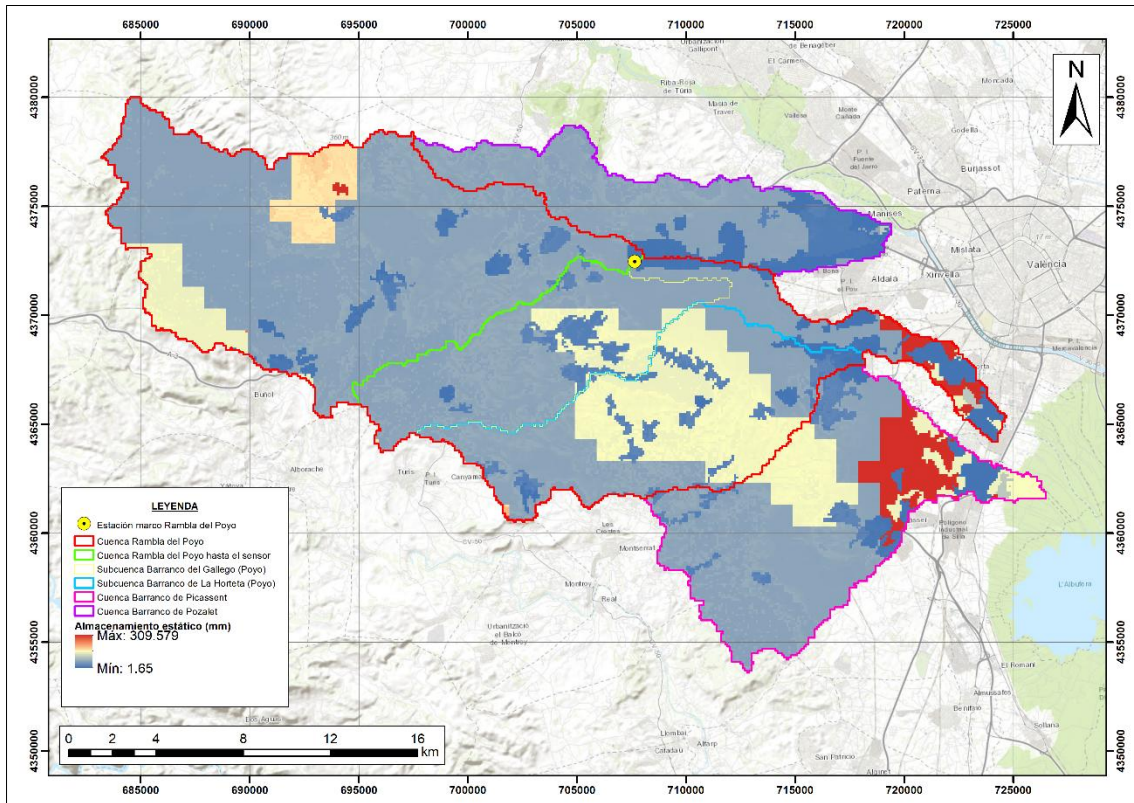


Figura 25. Almacenamiento estático del suelo (mm) en el ámbito de estudio.

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPESA.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos del almacenamiento estático (mm).

Estadístico	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Cuenca Rambla del Poyo	1.6	309.6	70.3	58.1
Cuenca Rambla del Poyo hasta sensor	1.6	309.6	66.1	56.9
Subcuenca Barranco de La Horteta (Poyo)	1.6	254.0	84.6	63.0
Cuenca Barranco de Picassent	9.9	259.3	87.9	59.5
Subcuenca Barranco del Gallego (Poyo)	9.9	154.2	63.8	59.0
Cuenca Barranco de Pozolet	2.5	93.2	47.4	57.1

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPESA

El parámetro Ks representa la capacidad de infiltración del suelo, expresada en milímetros por hora (mm/h). El parámetro Kss corresponde a la conductividad hidráulica del interflujo, también expresada en mm/h. En el contexto del presente modelo hidrológico, los mapas de ambos parámetros se consideran representativos y equivalentes. La distribución espacial de ambos parámetros se presenta en la Figura 26, mientras que los principales estadísticos descriptivos se presentan en la Tabla 5.

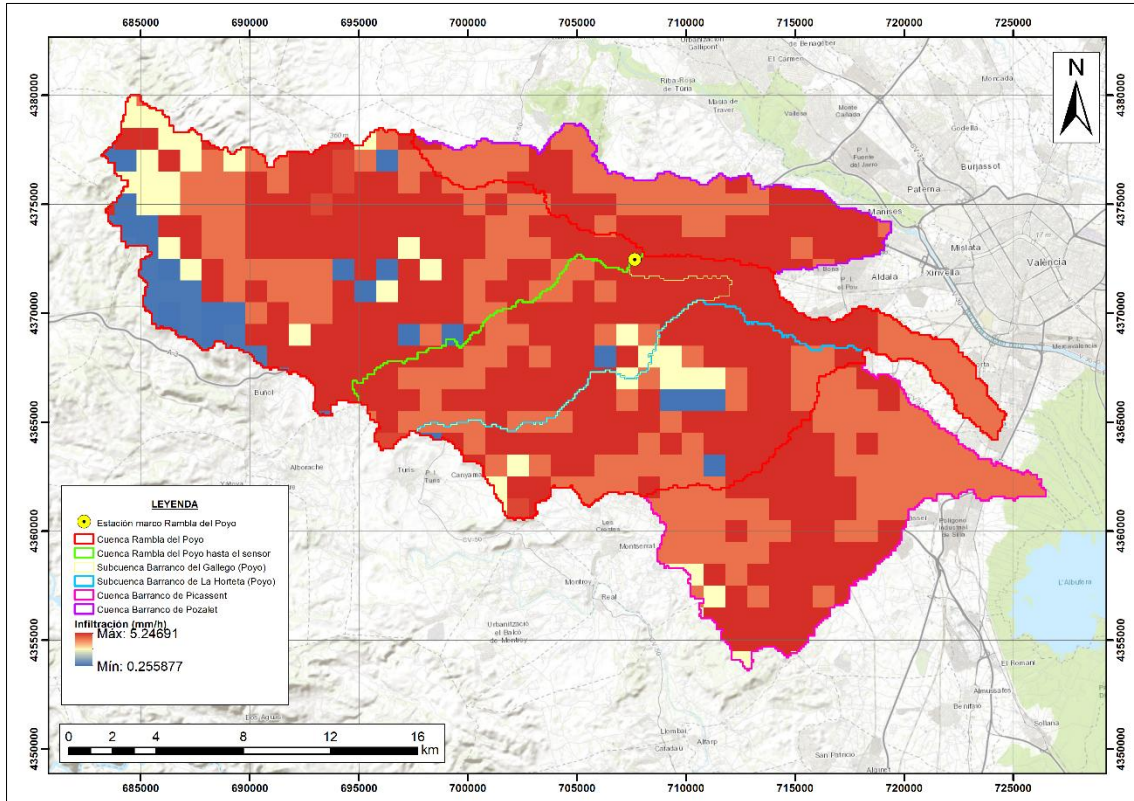


Figura 26. Capacidad de infiltración Ks y conductividad hidráulica del interflujo Kss.

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPsa.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de infiltración (mm/h).

Estadístico	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Cuenca Rambla del Poyo	0.256	5.247	4.457	5.197
Cuenca Rambla del Poyo hasta sensor	0.256	5.247	4.185	5.197
Subcuenca Barranco de La Horteta (Poyo)	0.662	5.247	4.593	5.197
Cuenca Barranco de Picassent	2.913	5.247	4.767	4.478
Subcuenca Barranco del Gallego (Poyo)	0.662	5.247	4.828	5.197
Cuenca Barranco de Pozolet	4.471	5.247	4.876	5.197

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPsa.

### 3.1.3. Parámetros relacionados al acuífero

La capacidad de percolación ( $K_p$ ), la conductividad hidráulica del acuífero somero ( $K_{sa}$ ) y la capacidad de pérdidas del acuífero profundo ( $K_{ps}$ ), expresadas en milímetros por hora (mm/h), están representadas conjuntamente por el mismo ráster, cuya distribución espacial se muestra en la Figura 27 y sus estadísticos descriptivos se presentan en la Tabla 6.

Los valores de estos parámetros presentan una notable heterogeneidad espacial. Según la leyenda del mapa, los valores varían entre un mínimo de 0.04167 mm/h y un máximo de 41666.7 mm/h, lo que sugiere la coexistencia de zonas con muy baja capacidad de percolación y conductividad hidráulica junto a otras con unas altas capacidades.

En términos espaciales, se observa que los valores más altos se concentran principalmente en la parte baja de la cuenca del Barranco de Pozalet, así como en la parte alta y media de la cuenca Rambla del Poyo que coincide principalmente con la red de cauces del Barranco del Gayo, Barranco de Cueva Morica y la Rambla de Chiva/Poyo, lo que está asociado a materiales de alta permeabilidad tal como los depósitos del cuaternario (Camarasa Belmonte, 1990). Por el contrario, los valores bajos ocupan la mayor parte del territorio, lo que corresponde a materiales con baja conductividad como las calizas, dolomías, arcillas y margas (Camarasa Belmonte, 1990).

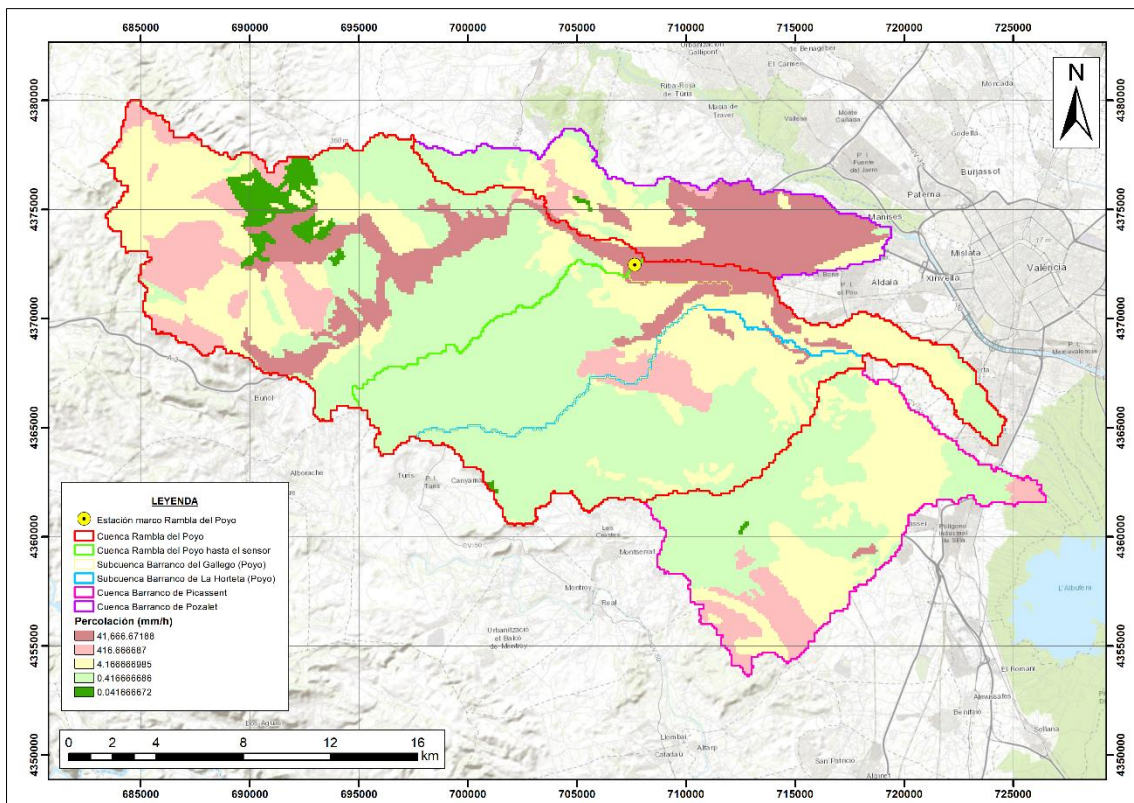


Figura 27. Parámetro de la capacidad de percolación.

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYP SA.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la capacidad de percolación (mm/h).

<b>Estadístico</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>
Cuenca Rambla del Poyo	0.042	41666.67	4770.32	0.42
Cuenca Rambla del Poyo hasta sensor	0.042	41666.67	6645.41	4.17
Subcuenca Barranco de La Horteta (Poyo)	0.042	41666.67	532.44	0.42
Cuenca Barranco de Picassent	0.042	41666.67	200.53	4.17
Subcuenca Barranco del Gallego (Poyo)	0.417	41666.67	2226.24	0.42
Cuenca Barranco de Pozalet	0.042	41666.67	19875.17	416.67

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPESA

#### **3.1.4. Cubierta del suelo**

Se han identificado un total de diecisiete (17) tipos diferentes de grupos de vegetación (Figura 28) dentro de las cuencas de L’Horta Sud. Cada grupo de vegetación está asociado a valores de factores de vegetación que presentan una variabilidad a nivel mensual, además de presentar la interceptación máxima para las abstracciones iniciales. Estos coeficientes son empleados en el modelo para la corrección de la evapotranspiración de referencia empleado como dato de entrada al modelo hidrológico.

En términos generales, la parte superior del área drenante de la estación marco Rambla del Poyo se caracteriza por la presencia de matorrales con dispersos parches de bosques de pinos. En la zona intermedia del área drenante, predominan las tierras de secano, junto con áreas focalizadas de cultivos de cítricos. Por último, la zona baja corresponde a la llanura de inundación, donde se encuentra un mosaico de áreas urbanas, tierras agrícolas dedicadas al cultivo de hortalizas y cítricos (Bussi, 2014).

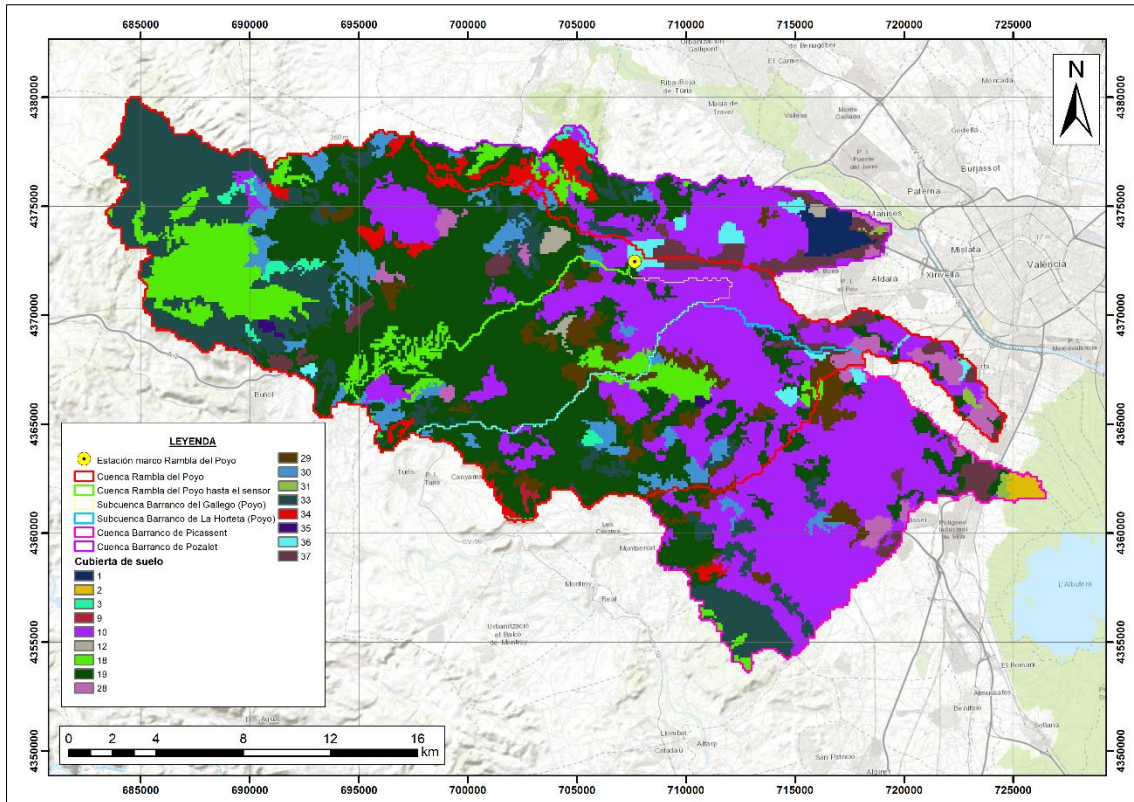


Figura 28. Distribución espacial de los factores de cultivo.

Fuente: Elaboración propia con los mapas de parámetros de TYPASA.

### 3.1.5. Parámetros geomorfológicos

Se conservaron los valores de los parámetros geomorfológicos del modelo de Tyspa-IIAMA (2019), los cuales, a su vez, se basan en los valores adoptados por Bussi (2014). El área de captación para la formación de cárcavas y cauces fue estimada a partir de levantamientos de campo realizados por Bussi (2014), definiéndose en 0.01 km<sup>2</sup> para cárcavas (área umbral para el interflujo) y 15.35 km<sup>2</sup> para cauces (área umbral para el flujo base).

Tabla 7. Parámetros geomorfológicos

Parámetro	Tipo	Descripción	Valor
$\kappa$	Coeficiente	Caudal a sección llena en función del área	0.600
$\phi$	Coeficiente	Ancho en función del caudal a sección llena	3.260
$a_1$	Coeficiente	Diámetro del sedimento	20.000
$\alpha_1$	Coeficiente	Coeficiente de Manning en función del sedimento	0.047
$\alpha_2$	Exponente	Caudal a sección llena en función del área	0.750
$c_d$	Exponente	Ancho en función del caudal a sección llena	0.500
$\theta$	Exponente	Ancho en función del caudal	0.200
$c_n$	Exponente	Diámetro del sedimento	1.250
$\xi$	Exponente	Coeficiente de Manning en función del sedimento	0.167

Fuente: Bussi (2014)

### 3.2. Mapas del modelo de sedimentos

Los mapas de parámetros empleados en el modelo de sedimentos tienen una resolución espacial de 100 x 100 metros y fueron proporcionados por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) y corresponden a los empleados por Bussi (2014), el cual fue extendido para cubrir la zona de cabecera de la subcuenca del Barranco de Picassent.

En referencia a su extensión, abarca la cuenca de Torrent y la subcuenca del Barranco de Pozalet. En total, se requieren de seis ráster que representan a la textura del suelo (porcentaje de arena, limo y arcilla) y factores relacionados a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés): Factor K, C y P.

#### 3.2.1. Textura del suelo

La información sobre la textura del suelo utilizada en este estudio fue obtenida por Bussi (2014), a partir de los perfiles edáficos recopilados en el marco del proyecto Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME). En dicho trabajo, se asignaron valores específicos de textura —es decir, los porcentajes de arena, limo y arcilla— a cada unidad cartográfica definida por el proyecto. Gracias a esta asignación directa, no se aplicaron métodos de interpolación espacial para estimar la textura en áreas sin datos puntuales. La distribución espacial de la textura del suelo se presenta en las Figura 29, Figura 30 y Figura 31.

En términos espaciales, se observa una clara diferenciación en la distribución de texturas a lo largo de la cuenca. En la parte alta, predominan suelos con una elevada proporción de fracciones gruesas (arena), alcanzando hasta un 80%. Por el contrario, en la parte baja de la cuenca se encuentran suelos con texturas más finas, donde el contenido de limo y arcilla es relativamente mayor.

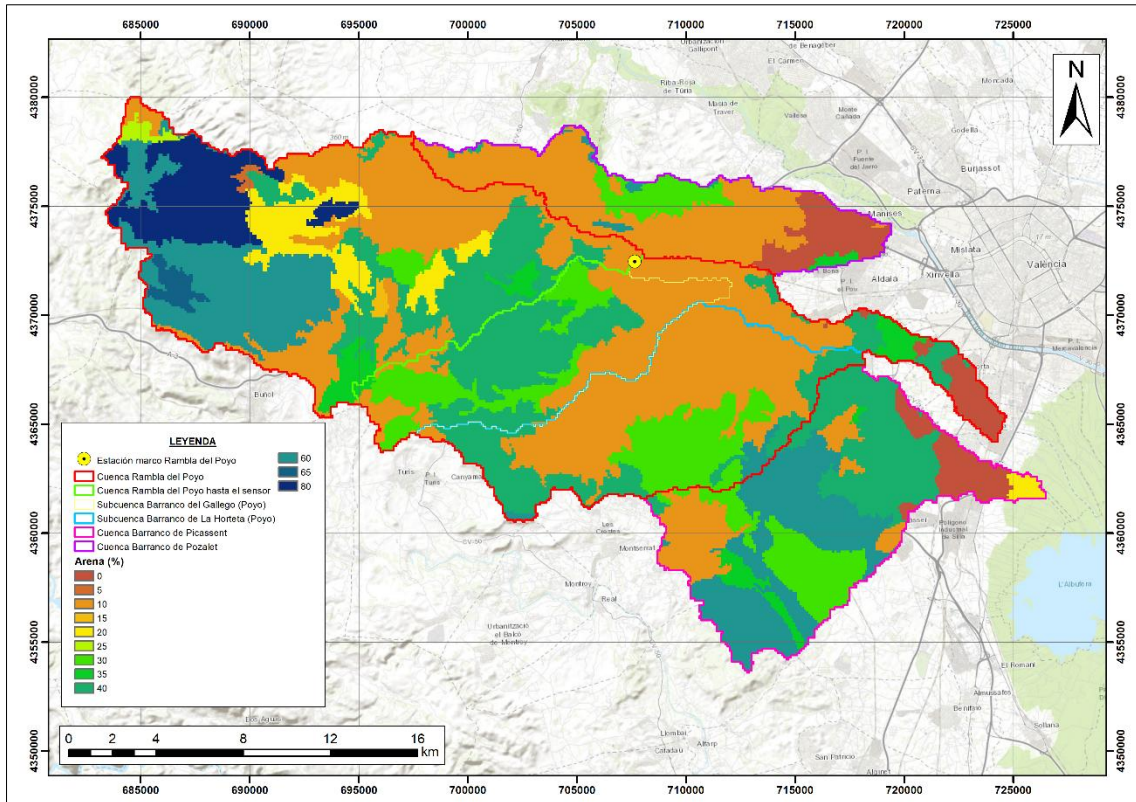


Figura 29. Textura del suelo - porcentaje de arena (%).  
Fuente: Elaboración propia con datos de Bussi (2014).

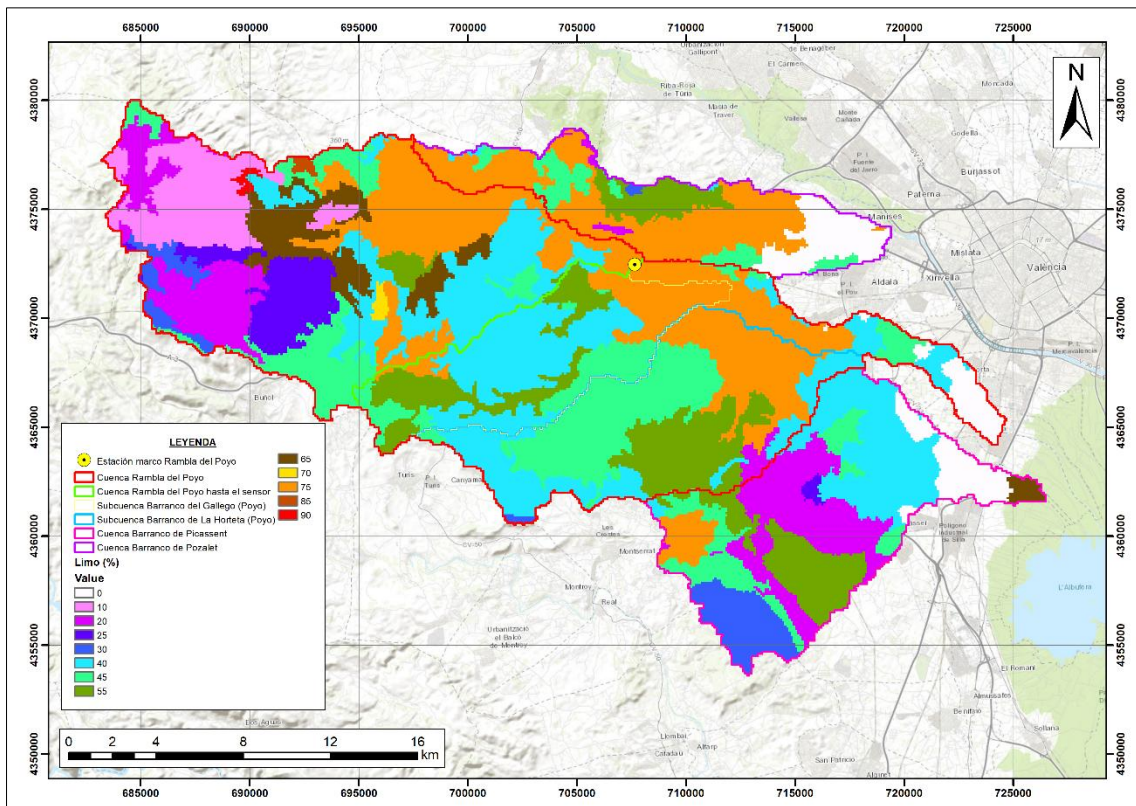


Figura 30. Textura del suelo - porcentaje de limo (%).  
Fuente: Elaboración propia con datos de Bussi (2014).

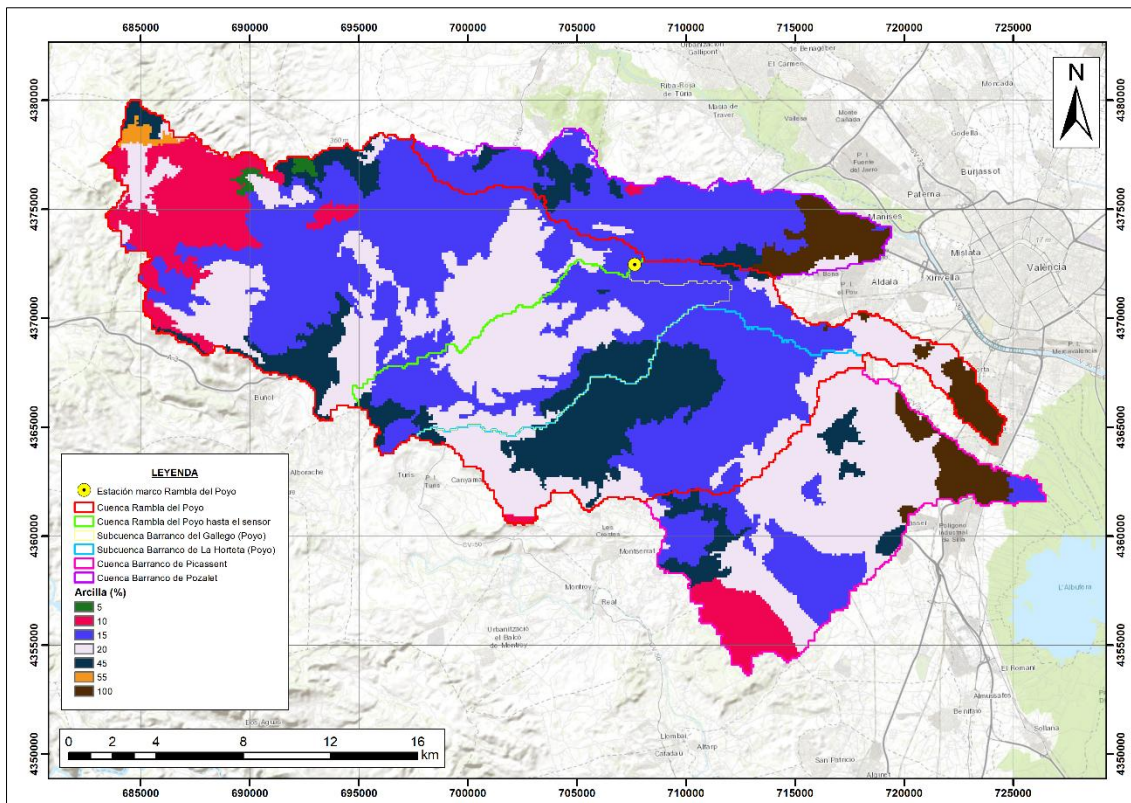


Figura 31. Textura del suelo - porcentaje de arcilla (%).  
Fuente: Elaboración propia con datos de Bussi (2014).

### 3.2.2. Factores de erosión (USLE)

Se utilizaron los mapas de parámetros generados por Bussi (2014), basados a su vez en un estudio previo realizado por Antolín Tomás (1998). En dicho estudio, el factor C fue estimado en función del tipo y densidad de la cobertura vegetal, siguiendo las directrices de Wischmeier y Smith (1978) y de Dismeyer y Foster (1984), ambos citados por Bussi (2014). Por otro lado, el factor K fue determinado a partir de análisis edáficos (textura, contenido de materia orgánica y salinidad), empleando una base de datos que abarca toda la Comunidad Valenciana y aplicando la ecuación propuesta por Wischmeier y Mannering (1969), también citada por Bussi (2014). Posteriormente, estos valores fueron interpolados espacialmente.

En la cuenca Rambla del Poyo, el factor C representa la influencia de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica, constituyendo uno de los componentes clave en la estimación de la pérdida de suelo mediante la ecuación USLE. Los valores de este factor oscilan entre 0.0 y 0.318. Las zonas de cabecera presentan los valores más elevados (hasta 0.32), asociados a áreas con vegetación arbustiva poco densa. Asimismo, los valores más bajos, está más asociadas a zonas urbanas. La distribución espacial se presenta en la Figura 32.

En cuanto al factor K, este expresa la susceptibilidad del suelo a la erosión por el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, en función de propiedades como la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo. En la

cuenca, los valores de K varían entre 0.0 y 0.450 t.ha.h·ha<sup>-1</sup>.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>. Su distribución espacial se presenta en la Figura 33.

Cabe señalar que el factor P de la ecuación USLE se estableció en 1, al no haberse implementado prácticas de conservación del suelo en la cuenca.

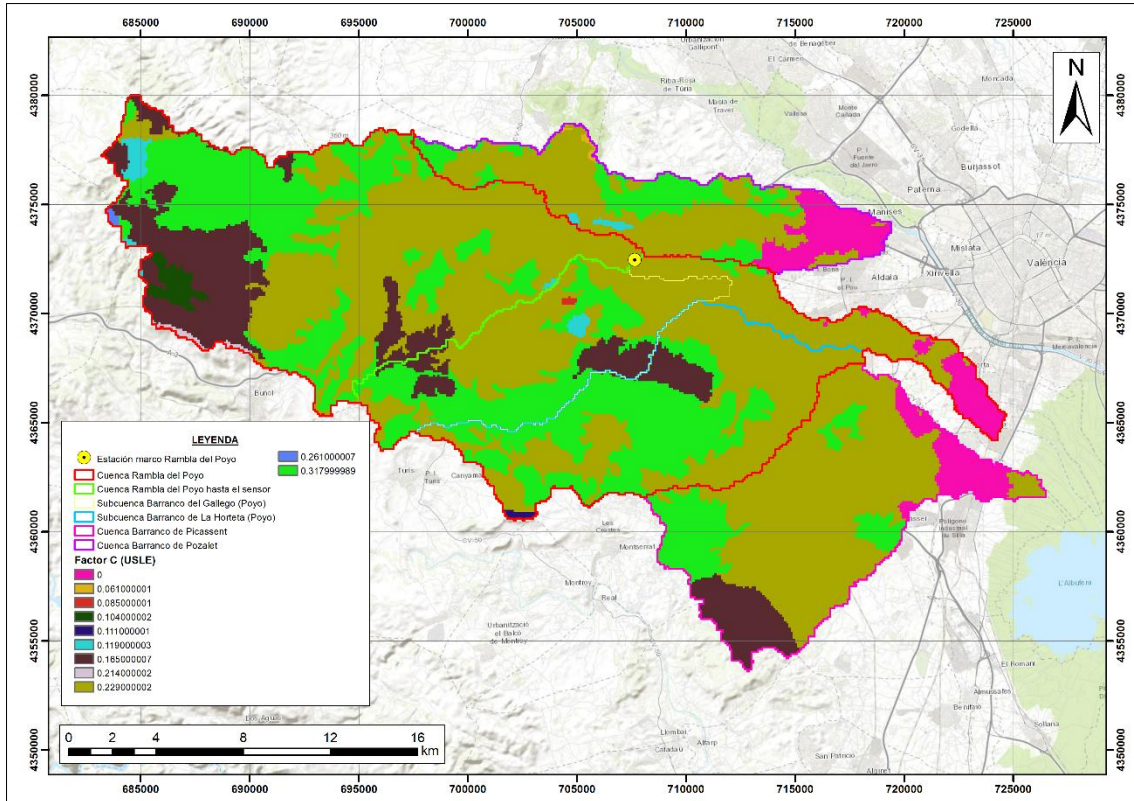


Figura 32. Factor de la cubierta de suelo (Factor C)  
Fuente: Elaboración propia con datos Bussi (2014).

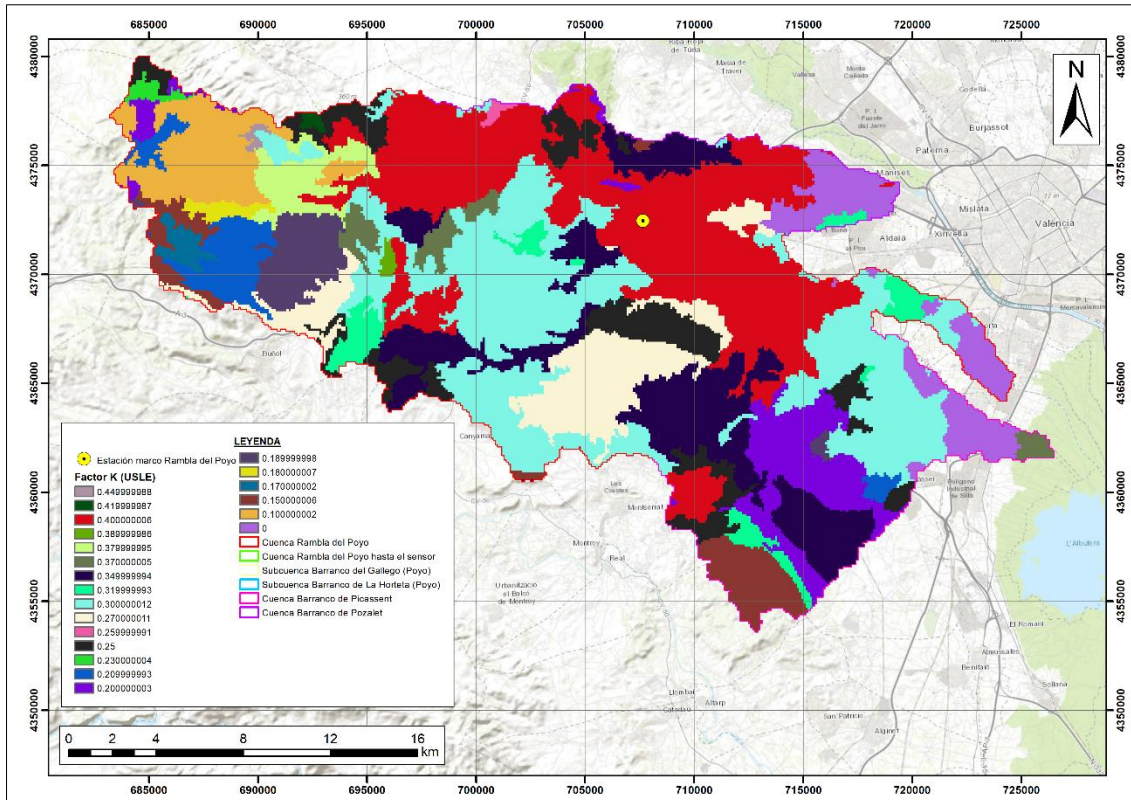


Figura 33. Factor de la erosionabilidad del suelo (Factor K)  
 Fuente: Elaboración propia con datos Bussi (2014).

### 3.3. Información hidrometeorológica

#### 3.3.1. Sistema Automático de Información Hidrológica

Parte de la información utilizada para la descripción hidrometeorológica proviene del Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Júcar (SAIH-CHJ). Esta base de datos incluye mediciones de precipitación acumulada cada 5 minutos, las cuales se pueden agregar posteriormente para obtener lluvia acumulada en 10 minutos. Asimismo, el SAIH-CHJ dispone de registros de caudal en la estación de aforo de la Rambla del Poyo, también con una resolución de 5 minutos, que fueron transformados a escala 10 minutil mediante un promedio de valores. Vale precisar que la información de lluvias proveniente del SAIH-CHJ fue usado exclusivamente en el modelo subdiario (10 minutil).

##### 3.3.1.1. Precipitación

A partir de un primer análisis exploratorio sobre la influencia de la lluvia en la estimación de la precipitación media (Sección 5.1), se preseleccionaron 19 estaciones pluviométricas ubicadas dentro de un radio de 15 km del área drenante de La Albufera, las cuales, según el análisis desarrollado en la Sección 4.1, ejercen influencia en la estimación de la precipitación en la zona de estudio. La información detallada sobre estas estaciones se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Estaciones pluviométricas del SAIH-CHJ

Estación	Coordenadas UTM (ETRS 1989 – Zona 30N)		
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
Huerto Mulet	723737	4340858	17
Guadassuar	718380	4342128	29
Sueca	729848	4342426	11
Prada	712211	4344839	61
Sierra Ave	692952	4351363	550
Real de Montroy	707734	4355523	198
Forata	684122	4356693	398
Picassent	716988	4363363	63
Chiva	694828	4369995	323
Rambla del Poyo	707810	4372100	112
Valencia	727260	4372972	10
Siete Aguas	680666	4373131	840
Repartiment	720282	4373630	35
La Presa	714200	4377367	71
Vilamarxant	704385	4384008	97
Buseo	676773	4384927	492
Bugarra	690376	4386379	172
Rambla Castellana	700635	4389085	153
Loriguilla	679008	4392863	331

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad que permitió reducir de diecinueve a cinco las estaciones consideradas, al ser estas las que presentaron mayor influencia sobre las áreas de interés hidrológico y que, junto a las estaciones de AVAMET y AEMET, permitieron representar de manera más adecuada la distribución de lluvias. Las estaciones finalmente seleccionadas fueron: Chiva, La Presa, Picassent, Rambla del Poyo y Repartiment.

### 3.3.1.2. Caudales

La cuenca de la Rambla del Poyo dispone de una única estación destinada a la medición de los caudales circulantes con una frecuencia de 5 minutos desde 1988 a la actualidad. Esta información fue empleada en el modelo diario y subdiario. A continuación, se presenta el detalle de su ubicación.

Tabla 9. Estaciones foronómica empleada en el estudio

Estación	Coordenadas UTM (ETRS 1989 – Zona 30N)		
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
Rambla del Poyo	707755	4372347	116

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ

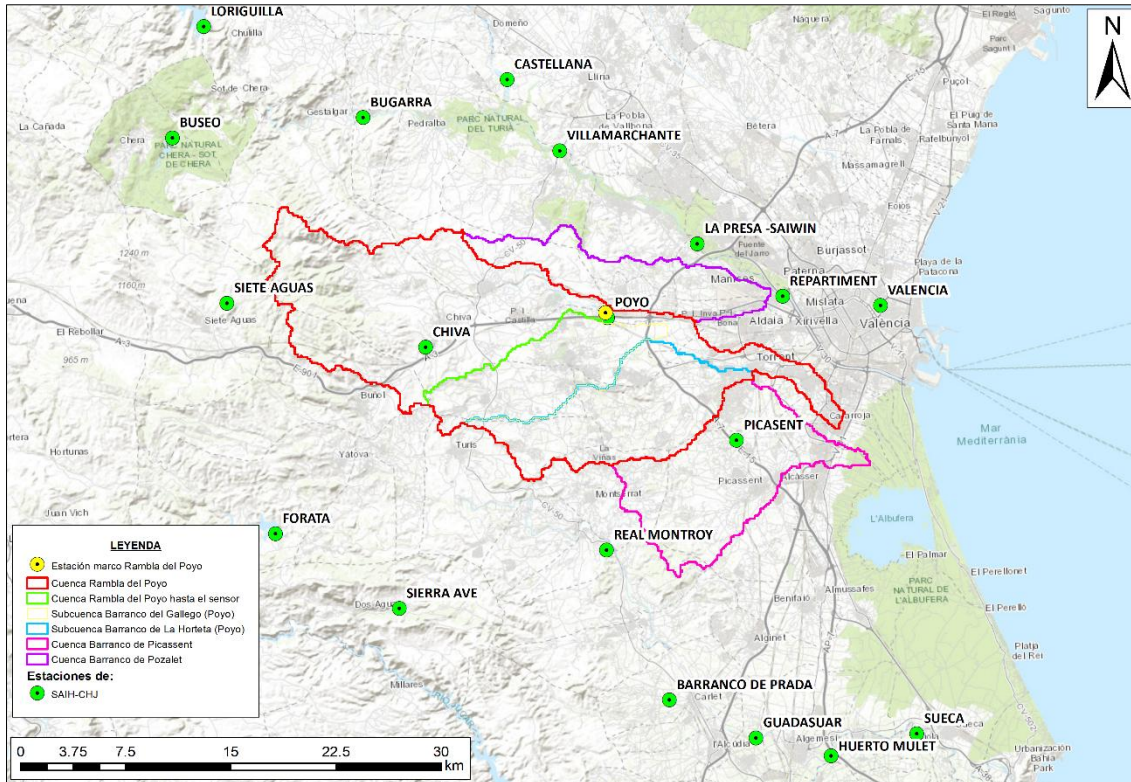


Figura 34. Pluviómetros preseleccionados en el buffer de 15 km  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2. Sistema de Información Agroclimática para el Regadío

#### 3.3.2.1. Evapotranspiración

En el análisis de eventos de crecidas, la evapotranspiración desempeña un papel limitado en la generación de escorrentía superficial. No obstante, sigue siendo importante obtener valores que reflejen de manera razonable la realidad, aunque con menores exigencias en cuanto a precisión. Por esta razón, se ha decidido emplear la información de evapotranspiración de referencia (ETO) disponible en el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), que dispone de estaciones en el territorio español que permiten la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman-Monteith. Las coordenadas y características de las estaciones en cuestión son detalladas en la Tabla 10.

Tabla 10. Estaciones empleadas de la red del SIAR

Estación	Coordenadas UTM (ETRS 1989 – Zona 30N)			Fecha	
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	Instalación	Calibración
Cheste	693888	4376790	315	3-nov-99	26-jul-23
Godolleta	699949	4366120	233	25-nov-13	25-jul-23
Picassent	715588	4359990	90	24-ene-01	25-jul-23

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAR

A partir de los valores diarios calculados por el SIAR se obtuvieron los valores promedio mensuales multianuales de la evapotranspiración de referencia (mm/día)

para cada estación de análisis. Los periodos involucrados para el cálculo del promedio, así como sus valores medios se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. Evapotranspiración de referencia (mm/día) en las estaciones del SIAR

Valor	Estaciones		
	Cheste	Godolleta	Picassent
Enero	1.213	1.715	1.476
Febrero	1.692	2.086	1.886
Marzo	2.48	2.809	2.582
Abril	3.231	3.442	3.308
Mayo	4.062	4.431	4.272
Junio	4.905	5.162	5.082
Julio	5.036	5.368	5.224
Agosto	4.379	4.767	4.603
Septiembre	3.095	3.436	3.363
Octubre	2.058	2.354	2.213
Noviembre	1.374	1.692	1.531
Diciembre	1.009	1.383	1.217
Fecha de inicio	01-ene-00	01-ene-14	01-ene-02
Fecha de fin	31-dic-23	31-dic-23	31-dic-23

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ

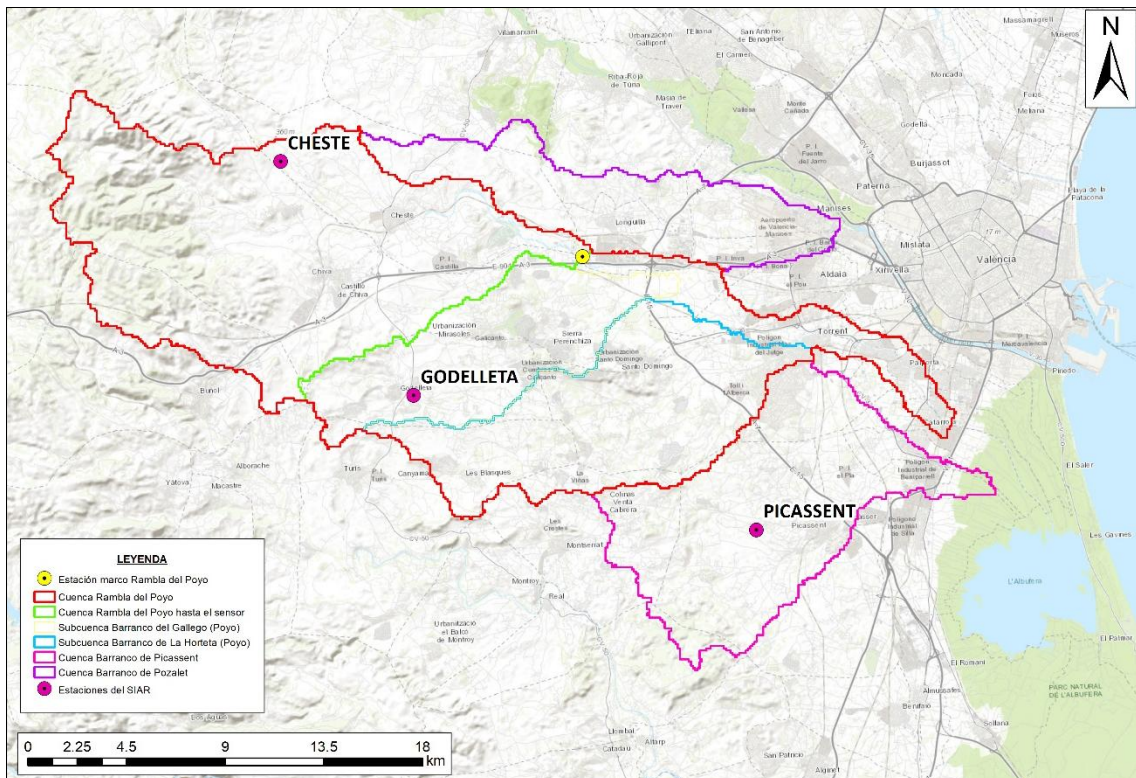


Figura 35. Estaciones de evapotranspiración potencial (SIAR)

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3. Agencia Estatal de Meteorología

#### 3.3.3.1. Estaciones pluviométricas

En función de la disponibilidad y completitud de datos desde 1990 hasta 2024, se seleccionaron dos (2) estaciones pluviométricas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que proporcionan registros de precipitación acumulada diaria. Las coordenadas geográficas de estas estaciones se detallan en la Tabla 12, mientras que su cobertura temporal se representa mediante un mapa de calor en la Figura 36. Vale precisar que para el caso de la estación Turís (Masía Calabarra), esta se empleó en el modelo diario y subdiario ya que se cuenta con la información disponible a escala diaria y 10 minatural.

Tabla 12. Estaciones pluviométricas de AEMET

Estación	Coordenadas UTM (ETRS 1989 – Zona 30N)		
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
Turís (Masía Calabarra)	704990	4362668	196
Chiva (Segunda)	696860	4371714	247

Fuente: Elaboración propia con datos de la AEMET

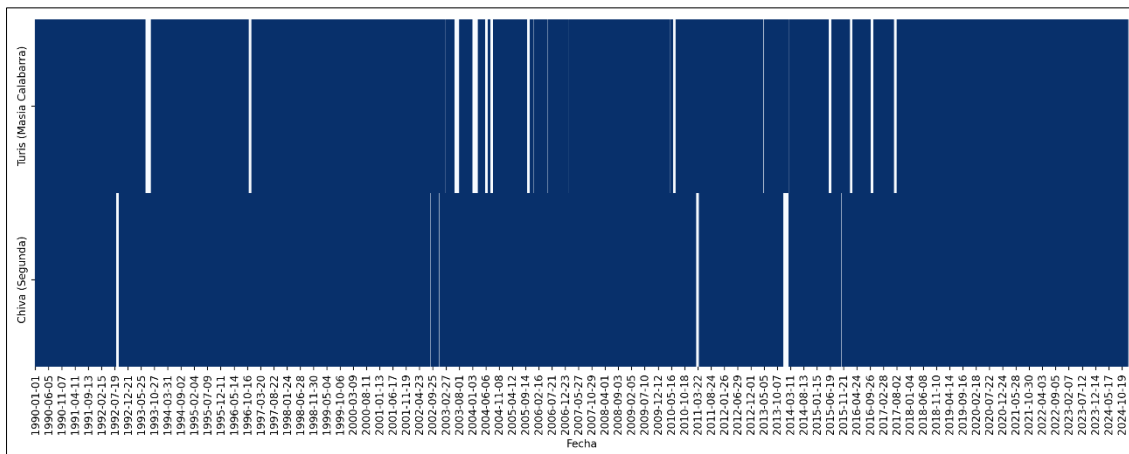


Figura 36. Disponibilidad de información en las estaciones de AEMET

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.4. Asociación Valenciana de Meteorología

Parte de la información utilizada para la caracterización hidrometeorológica proviene de la Asociación Valenciana de Meteorología (AVAMET). Esta base de datos corresponde exclusivamente al evento de la DANA 2024 y cuenta con una discretización temporal de 10 minutos en todo el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

En una primera selección se aplicó un criterio espacial de buffer de 15 km, lo que permitió identificar 44 estaciones pluviométricas de AVAMET. Sin embargo, finalmente se seleccionaron únicamente trece, dado que la elevada densidad de estaciones hacía que muchas no aportaran información adicional en la estimación de precipitaciones. Esto se debe a que, en este estudio, el método de interpolación de lluvias empleado

para el modelo subdiario en TETIS considera únicamente las cinco estaciones más cercanas, lo que dejaba sin uso a un número importante de ellas.

Tabla 13. Estaciones pluviométricas de AVAMET

Estación	Coordenadas UTM (ETRS 1989 – Zona 30N)		
	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
Alfarb - el Puntal	712396	4350761	103
Bunyol - Alto Gordo	685776	4369310	769
Bunyol - Partior	690377	4365312	341
Cheste - centro	699194	4373932	207
Chiva - Calicanto	709130	4368034	163
Manises - la Presa	713814	4377754	58
Montserrat - Casadalt	711884	4361834	184
Quart de Poblet	719978	4373436	42
Real	705987	4357028	131
Torís - Canyapar	700792	4362806	253
Torrent - CEIP Antonio Machado	717072	4367810	55
Vilamarxant - Mas de Teulada	699110	4382020	152
Vilamarxant - Sant Josep	704186	4382269	108

Fuente: Elaboración propia con datos de la AEMET

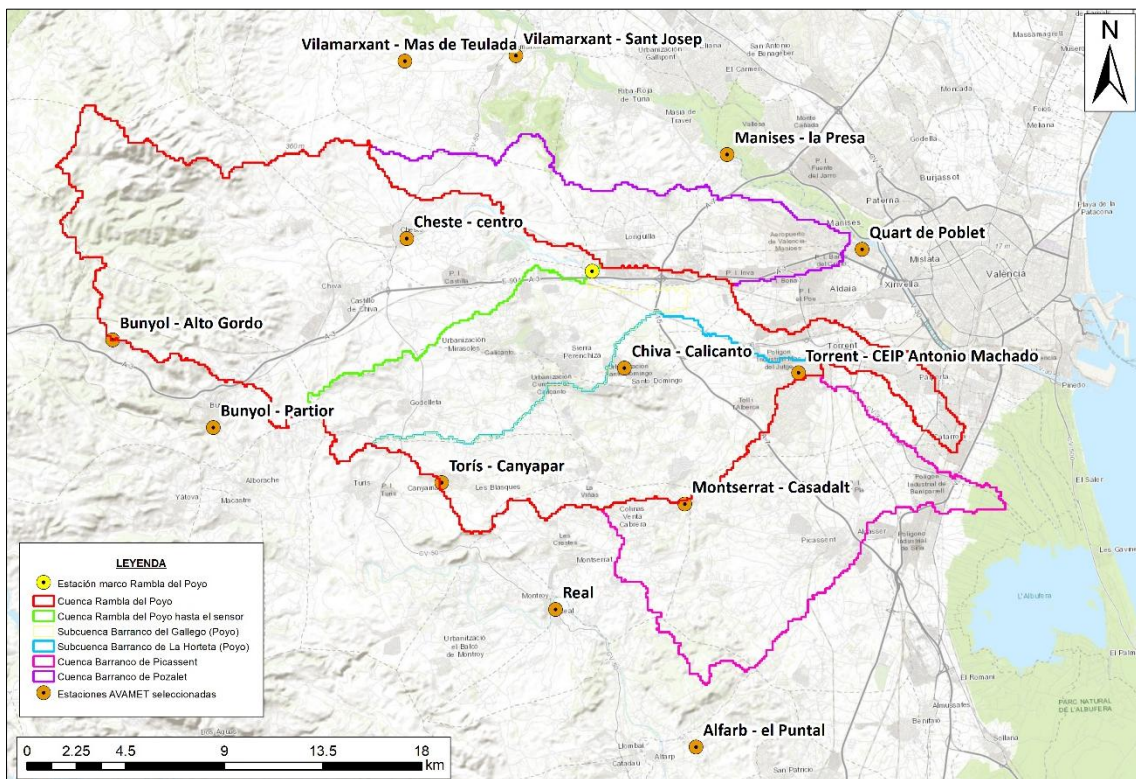


Figura 37. Estaciones AVAMET seleccionadas

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Información para la calibración del modelo de sedimentos

Dentro del área drenante asociada a la estación de aforos se localizan nueve azudes, cuya caracterización fue realizada en el trabajo de Bussi (2014). Estos azudes han sido incorporados en el presente modelo hidro-sedimentológico mediante el submodelo STEP, abarcando el periodo de evaluación comprendido entre 1990 y 2009. De esta manera, en la Tabla 14 se presentan las características geométricas de los azudes considerados. Cabe destacar que esta caracterización representa una versión simplificada de la geometría real de los azudes, debido a la falta de información precisa sobre su forma exacta, la cual se ve condicionada por la variabilidad del terreno. Por ello, Bussi (2014) ha asumido una sección transversal trapezoidal. La ubicación de los azudes en el área drenante de la Rambla del Poyo se presenta en la Figura 38.

Tabla 14. Características de los azudes

Azud	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	Área que drena (km <sup>2</sup> )	Pendiente local
P01	687029	4377660	608	9.13	0.229
P02	688528	4376445	492	12.9	0.077
P03	688528	4374350	515	8.04	0.102
P04	689739	4374350	458	10.07	0.109
P05	691350	4368273	220	16.6	0.018
P06	689941	4369256	220	14.99	0.146
P07	688634	4370260	540	2.33	0.043
P08	688041	4376250	515	5.36	0.043
P09	688142	4376739	539	1.00	0.146

Fuente: Elaboración propia con datos de Bussi (2014)

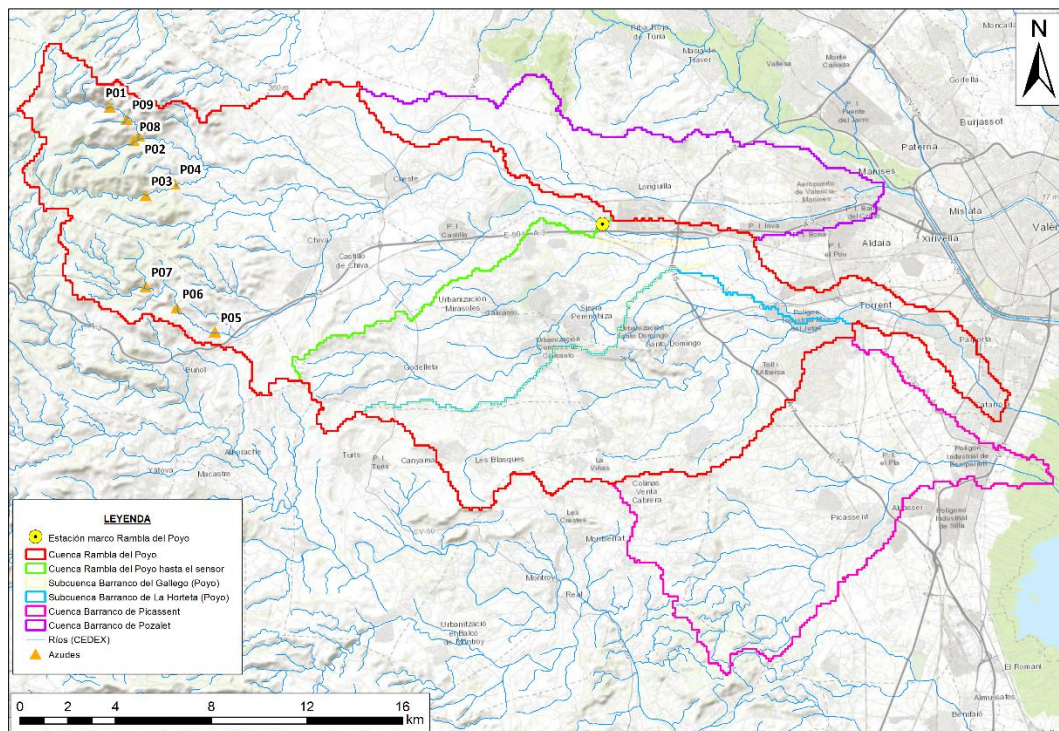


Figura 38. Ubicación de los azudes en el ámbito de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, la aplicación del submodelo STEP requiere la incorporación de información específica sobre el comportamiento sedimentológico de cada azud. En particular, es necesario disponer de datos sobre el volumen total de sedimentos depositados en cada estructura a lo largo del periodo de análisis, el levantamiento de información se realizó a fines del 2009 por Bussi (2014), así como de su capacidad máxima de almacenamiento y la densidad aparente de los sedimentos acumulados. Estos parámetros resultan fundamentales para la adecuada representación del balance de sedimentos en el sistema, ya que permiten estimar la evolución temporal del almacenamiento de sedimentos en cada azud.

Tabla 15. Características de los azudes y sedimentos depositados

<b>Azud</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Ancho de la base (m)</b>	<b>Pendiente (m/m)</b>	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
P01	5.0	15.0	20.0	12.0	0.229	1.245
P02	4.3	19.4	36.0	16.0	0.077	1.195
P03	4.5	13.0	21.7	10.2	0.102	1.245
P04	6.0	19.5	24.0	11.9	0.109	1.197
P05	3.2	20.0	35.0	12.2	0.014	1.206
P06	4.7	27.0	34.0	23.0	0.018	1.190
P07	5.4	12.7	11.0	4.6	0.146	1.206
P08	4.0	23.0	60.0	17.2	0.043	1.251
P09	2.0	12.5	13.8	8.5	0.146	1.245

Fuente: Elaboración propia con datos de Bussi (2014)

Si bien el submodelo STEP ha permitido la calibración de ciertos parámetros del modelo de sedimentos (transporte en ladera y cárcavas), fue necesario incorporar un dato adicional que sirviera como referencia externa para ajustar el balance total de sedimentos generado durante el evento analizado. Este valor fue obtenido a partir de López Gómez (2025), en el marco de un estudio desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos, en el que se estima que la cantidad total de sedimentos generados durante el evento de la DANA de 2024 se encuentra entre 20 y 25 hm<sup>3</sup>. Este volumen de sedimentos contabiliza: sedimentos en el área del modelado hidráulico, sedimentos retirados en zonas urbanas, sedimentos depositados en La Albufera y sedimentos vertidos al mar.

No obstante, dicha cifra no contemplaba de forma explícita los sedimentos depositados en zonas agrícolas y arrozales, por lo que fue necesario realizar un ajuste. En este ajuste, se asumió que el volumen de sedimentos depositados en las zonas agrícolas y arrozales no cubiertas en el estudio original es proporcional al volumen ya estimado para el área modelada por el CEH (9 hm<sup>3</sup>). Aunque esta relación constituye una simplificación considerable de la realidad, se consideró válida como una estimación aproximada (proxy) del volumen total de sedimentos generados durante el evento.

Para identificar estas zonas, se recurrió a dos fuentes de información: la delimitación de arrozales y tierras agrícolas se obtuvo a partir de la base de datos CORINE Land Cover (CLC 2018), mientras que las áreas afectadas por la deposición de sedimentos durante el evento fueron extraídas del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE). Según estos datos, el área afectada por sedimentos según SIOSE asciende a 103.6 km<sup>2</sup>, mientras que las superficies de arrozales y tierras agrícolas no contabilizadas en dicha área alcanzan los 49.0 km<sup>2</sup>.

Aplicando el mismo ratio de acumulación de sedimentos utilizado para el área de modelación hidráulica (CEH), se estima que estos 49.0 km<sup>2</sup> contribuyeron con un total de 4.3 hm<sup>3</sup>. En consecuencia, el volumen total de sedimentos generados durante el evento DANA 2024 se ha estimado en 29.3 hm<sup>3</sup>. Este valor representa la contribución conjunta de todas las áreas generadoras de sedimentos, que se muestran representadas en la Figura 39 mediante sombreado o achurado.

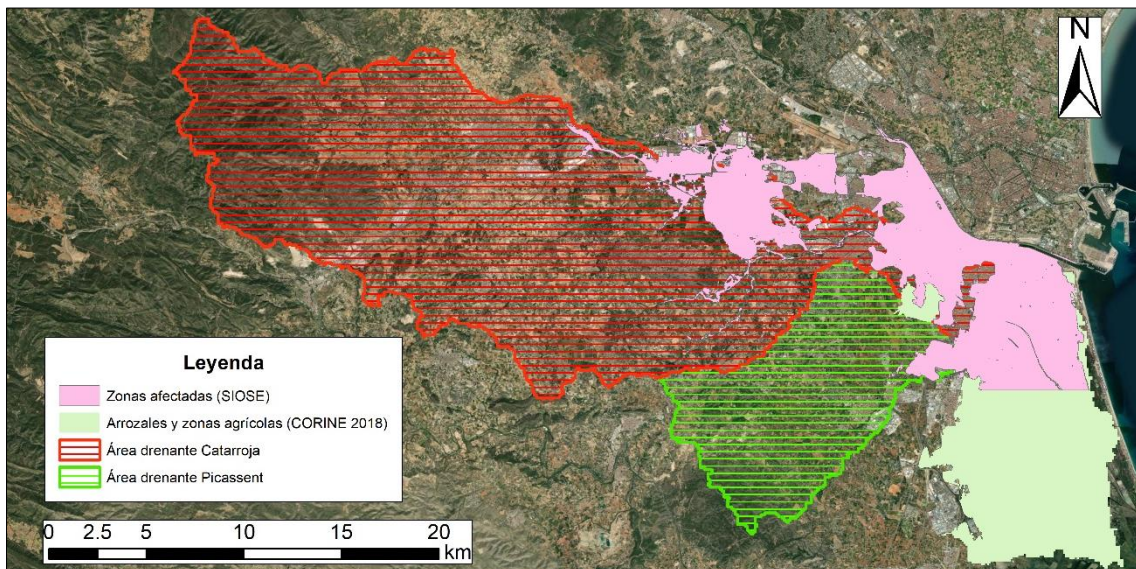


Figura 39. Áreas afectadas y zonas de interés.

Fuente: Elaboración propia.

## 4. Implementación del modelo diario

### 4.1. Selección de estaciones

El modelado hidro-sedimentológico a escala diaria abarcó un extenso período comprendido entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 2024. Para garantizar la fiabilidad de las simulaciones, es fundamental que las estaciones meteorológicas utilizadas sean representativas, es decir, que se encuentren dentro del área drenante de la cuenca y presenten una mínima proporción de datos faltantes a lo largo del periodo de análisis.

Considerando estos criterios, y tras evaluar la disponibilidad y calidad de los registros, se preseleccionaron un total de cuatro estaciones pluviométricas: dos pertenecientes a la AEMET y dos del SAIH-CHJ. La distribución espacial de estas estaciones se muestra en la Figura 40.

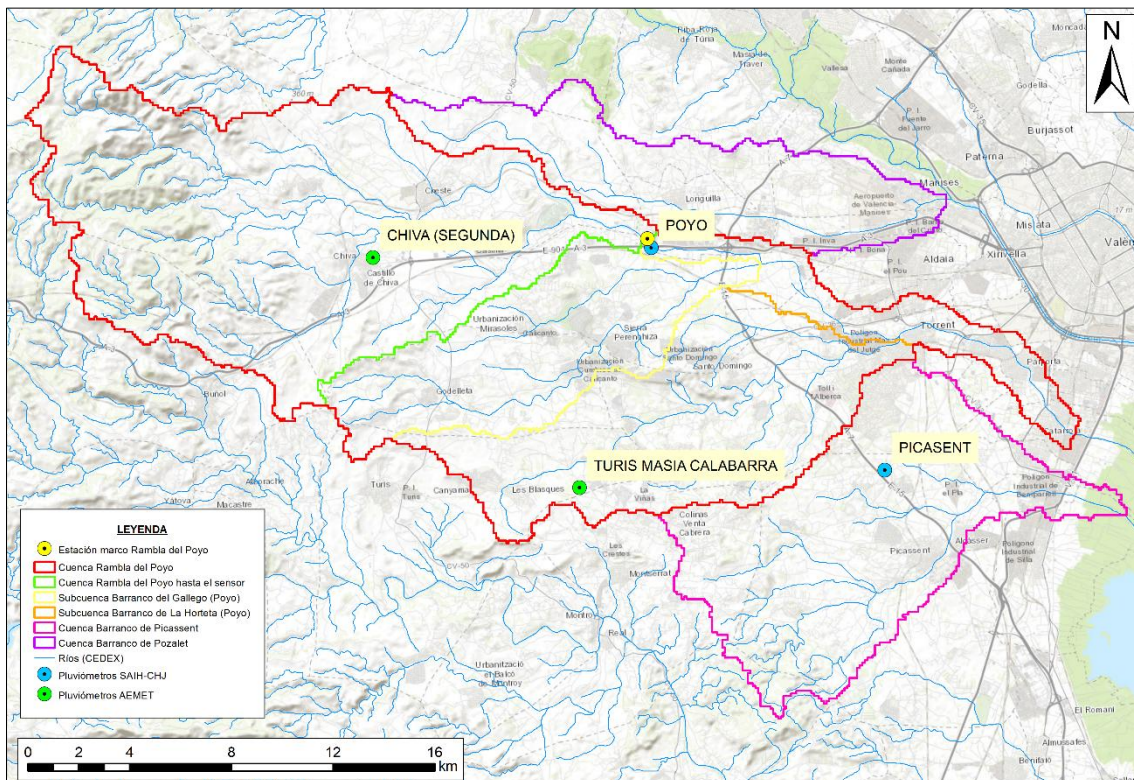


Figura 40. Pluviómetros seleccionados en el modelo diario

Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de afinar los resultados y mejorar la representatividad espacial de las estaciones pluviométricas empleadas en el modelo hidro-sedimentológico, se realizaron diversas pruebas para estimar la precipitación media sobre el área drenante de la estación de aforos de la Rambla del Poyo. Estas pruebas consistieron en combinar diferentes conjuntos de las cuatro estaciones seleccionadas previamente, variando el número de estaciones utilizadas en la interpolación, desde una estación como mínimo hasta un máximo de cuatro, tal como se detalla en Tabla 16.

Aunque inicialmente se planteó utilizar la mayor cantidad de estaciones, se observó que, en este caso en particular, la inclusión de la estación de Chiva (Segunda) de AEMET distorsionaba los resultados. Durante el evento de la DANA 2024, esta estación ha registrado un total de 210 mm mientras que en estaciones cercanas como Chiva La Pailla y Chiva del SAIH-CHJ registraron valores de 615 y 601.6 mm, respectivamente. Como resultado, la inclusión de la estación de Chiva Segunda ocasionó que la precipitación media en el área drenante disminuya y el caudal líquido diario para esa misma fecha fuera subestimado.

Tras analizar los diferentes escenarios, se determinó que la mejor combinación correspondía al uso de tres estaciones: Rambla del Poyo (PO), Picassent (PI) y Turís (TU). Esta configuración mantiene una buena cobertura espacial, y la precipitación media resultante se aproxima a los valores estimados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2025), quienes estimaron un valor de 367 l/m<sup>2</sup> para el 29 de octubre de 2024. Adicionalmente, el modelo diario considera la interpolación de lluvias con una estación con el propósito de representar una mayor lluvia en zonas de cabecera.

Tabla 16. Precipitación media en la DANA 2024 según combinación de estaciones pluviométricas

Estaciones		Número de estaciones a interpolar			
		1	2	3	4
4	PO, PI, CH, TU	210.5	231.5	257.8	247.7
3	PO, PI, CH	210.5	211.3	202.4	--
	PO, PI, TU	354.8	408.4	351.6	--
	PO, CH, TU	210.5	231.5	257.8	--
	PI, CH, TU	212.5	273.2	258.0	--
2	PO, PI	216.6	169.4	--	--
	PO, CH	210.5	211.3	--	--
	PO, TU	354.8	408.4	--	--
	PI, CH	210.0	197.1	--	--
	PI, TU	657.0	478.9	--	--
	CH, TU	212.5	273.2	--	--
1	PO	216.6	--	--	--
	PI	13.4	--	--	--
	CH	210.0	--	--	--
	TU	657.0	--	--	--

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ y AEMET

Nota: Pluviómetros de Rambla del Poyo (PO), Turís (TU), Chiva (CH) y Picassent (PI)

#### 4.2. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico a escala diaria fue calibrado y validado empleando los periodos 1996–2010 y 2011–2024, respectivamente. La precipitación fue asignada con un intervalo horario de 07:00 a 07:00 UTC, utilizando datos acumulados diarios a las 07:00 UTC. El proceso de calibración y validación se llevó a cabo de manera secuencial, de

modo que el estado final del periodo de calibración se utilizó como estado inicial para la validación, dado que ambos periodos son contiguos.

Adicionalmente, se consideraron pérdidas por transmisión asociadas a la desconexión hidráulica entre el cauce y el acuífero, fenómeno que favorece una infiltración constante de agua a través del lecho, conocido como efecto ducha (Montalvo Montenegro, 2017). Esta pérdida fue representada como un caudal constante de  $-0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , aplicado en la misma ubicación de la estación de aforo de la Rambla del Poyo durante todo el periodo de simulación. Los factores correctores seleccionados para el modelo a escala diaria se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Factores correctores empleados en el modelo a escala diaria

<b>Factor de corrección</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
FC1	Almacenamiento estático	0.18
FC2	Evapotranspiración	1.00
FC3	Infiltración	1.75
FC4	Escorrentía directa	1.00
FC5	Percolación	150.00
FC6	Interflujo	1.00
FC7	Flujo subterráneo profundo	150.00
FC8	Flujo base	0.00
FC9	Velocidad en red fluvial	0.35

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de minimizar el efecto del estado inicial en los resultados del modelo, se realizaron dos recirculaciones partiendo de un estado inicial completamente seco (valores cero en todos los tanques de almacenamiento). La primera recirculación (1R) consistió en utilizar el estado final del periodo de simulación 1990–2024 como nuevo estado inicial, repitiéndose el mismo procedimiento en una segunda recirculación (2R). Se observó que el estado inicial influye de forma significativa en los caudales simulados, especialmente durante los primeros años. En los primeros días de simulación, los errores relativos respecto a la recirculación anterior alcanzaron valores elevados, superiores al 600%. Sin embargo, esta diferencia se reduce progresivamente, estabilizándose en torno al 20% durante los siguientes siete años. Estos resultados se muestran en la Figura 41.

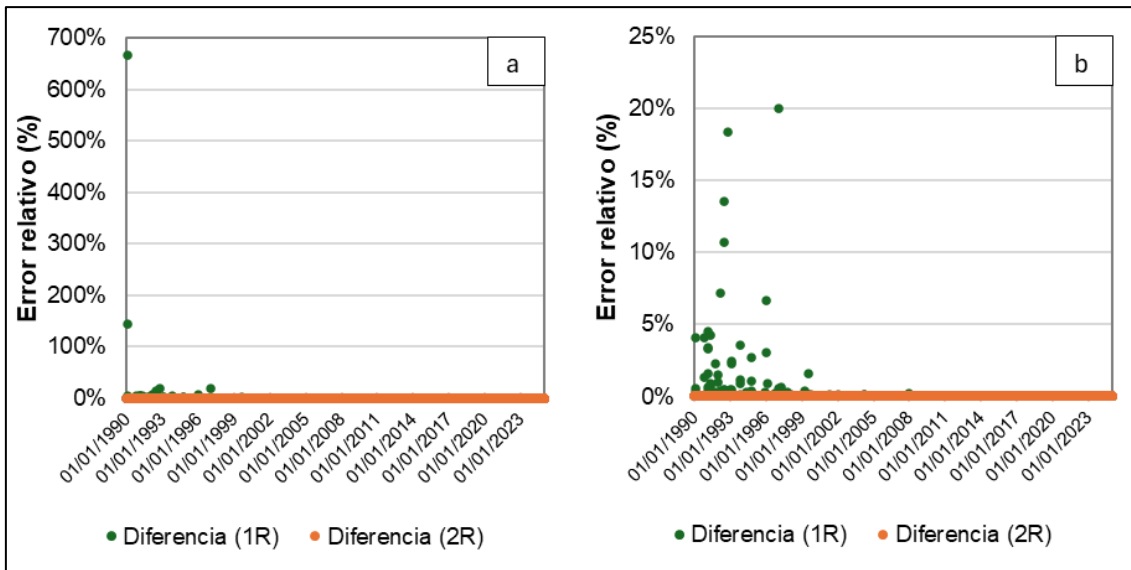


Figura 41. Errores relativos respecto a la simulación anterior – caudales líquidos.

Nota: (a) incluye todos los valores (b) eje Y acotado hasta 25% para mejorar visualización.

La calibración (Figura 42) se realizó para el periodo que comprende desde el 1 de enero de 1996 a 31 de diciembre de 2010. El caudal máximo observado en el periodo de calibración corresponde al 22 de octubre del 2000 con un caudal medio de 85.75 m<sup>3</sup>/s, mientras que el caudal simulado ascendió a 84.55 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0.52 considerado como satisfactorio (Moriasi et al., 2007). La validación (Figura 43) comprende desde el 01 de enero de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2024. El caudal máximo observado en el periodo de calibración corresponde al 29 de octubre del 2000 con un caudal medio de 475.4 m<sup>3</sup>/s, mientras que el caudal líquido simulado ascendió a 347.2 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, el índice de eficiencia de NSE fue de 0.92 considerado como muy bueno (Moriasi et al., 2007).

El modelo diario (Figura 44) ha reproducido de manera satisfactoria el comportamiento efímero de la Rambla del Poyo, ya que en el caudal contribuye en mayor medida la escorrentía directa que el interflujo, siendo este último entorno al 0.1% según la simulación realizada.

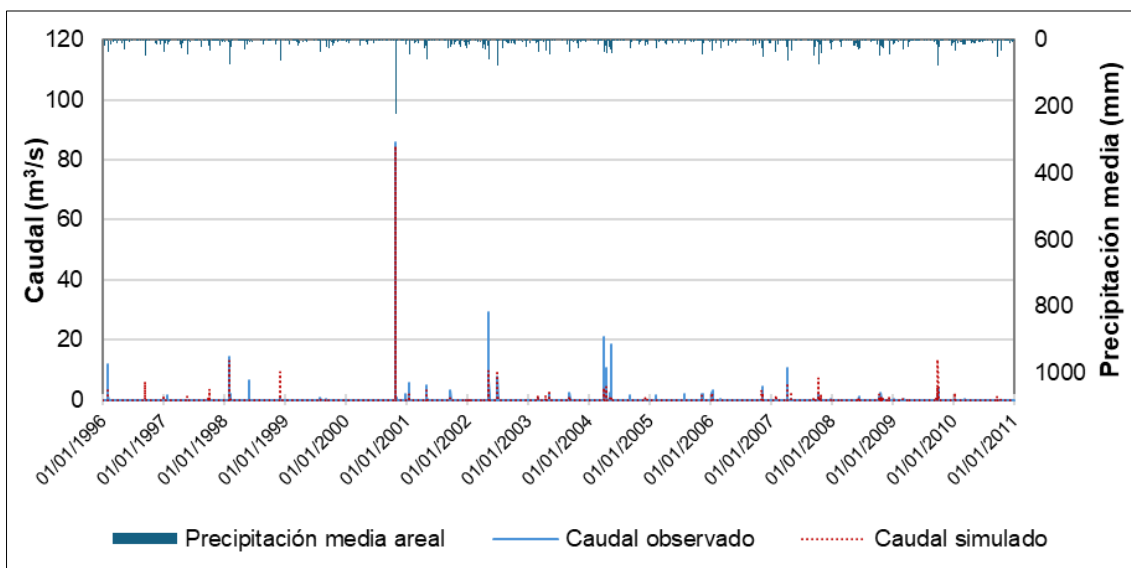


Figura 42. Calibración del modelo hidrológico a escala diaria (1996-2010).

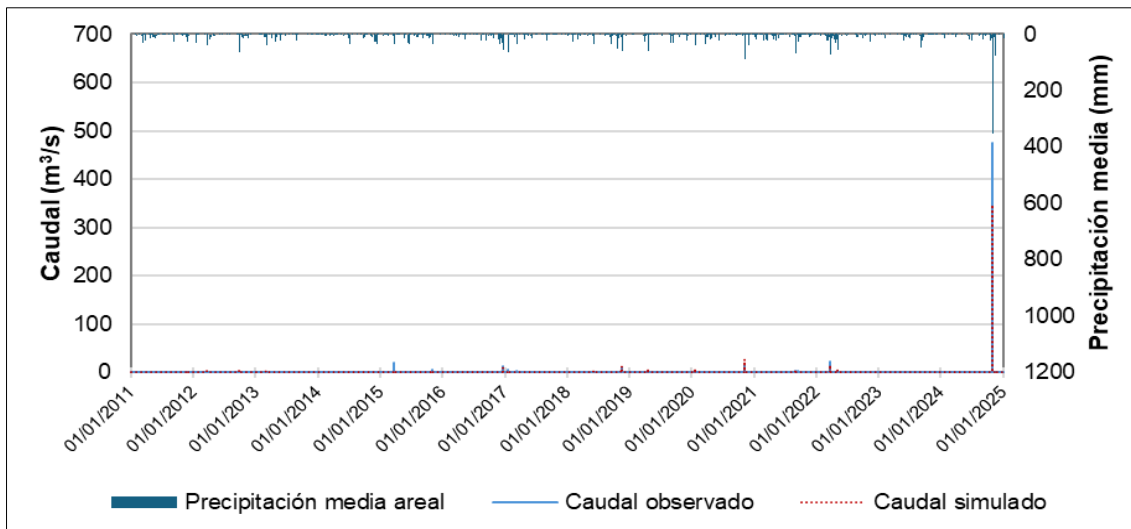


Figura 43. Validación del modelo hidrológico a escala diaria (2011-2024).

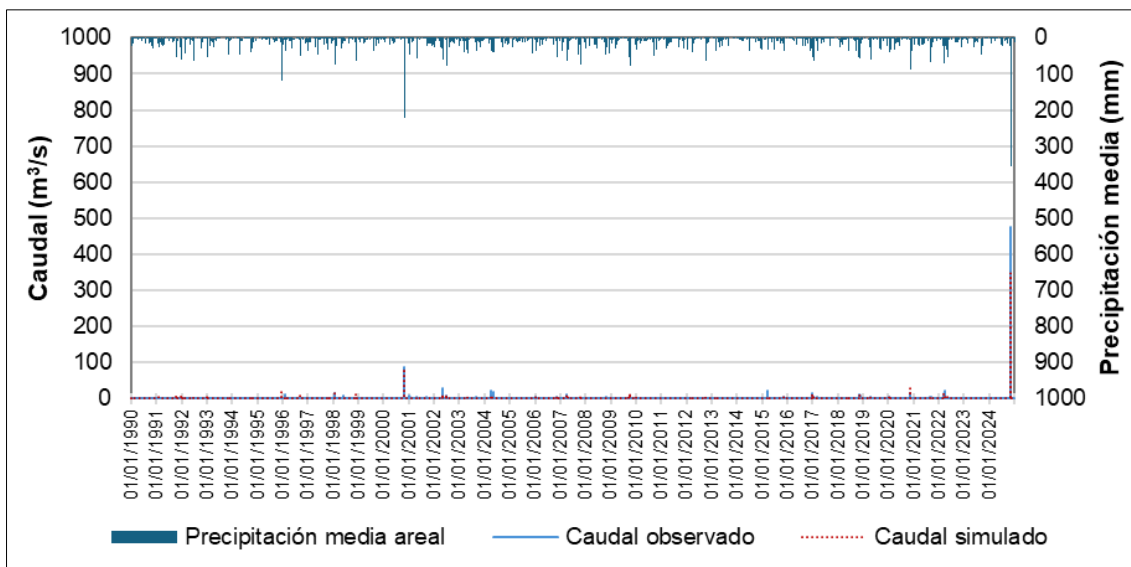


Figura 44. Simulación completa del caudal líquido a escala diaria (1990-2024).

### 4.3. Modelo sedimentológico

El modelo de sedimentos (caudales sólidos) está acoplado al modelo hidrológico (caudales líquidos). En particular, se ha empleado el submodelo STEP para la simulación y calibración de los procesos de generación y transporte de sedimentos, tanto en cárcavas como en laderas. Adicionalmente, para mejorar la fiabilidad del modelo en lo referente al transporte en cauce y ladera, se incorporó información empírica correspondiente al evento extremo de la DANA de 2024, que permitió afinar la calibración del modelo sedimentológico. El volumen ajustado de sedimentos transportados durante la DANA 2024 fue de 29.3 hm<sup>3</sup>. Este volumen total fue atribuido a las áreas generadoras de sedimentos identificadas dentro de la cuenca, las cuales se encuentran representadas en la Figura 39 (áreas sombreadas).

Para estimar el volumen de sedimentos transportados a través de la red de cauces hasta la estación de aforos de la Rambla del Poyo, se aplicó una relación lineal

simplificada entre caudal líquido y caudal sólido. Esta relación parte del supuesto de que, durante eventos, la generación de sedimentos es proporcional al volumen de escorrentía, lo que permite establecer un vínculo directo entre el hidrograma y la evolución del transporte sólido. A partir de esta hipótesis, se procedió a estimar el volumen total de sedimentos transportados hasta la estación de aforos, así como el caudal sólido medio diario durante el evento. La ecuación utilizada para este ajuste es la siguiente.

$$\frac{V_{\text{líquido,Poyo}}}{V_{\text{sólido,Poyo}}} = \frac{V_{\text{líquido,Catarroja}} + V_{\text{líquido,Picassent}}}{V_{\text{sólido,Catarroja}} + V_{\text{sólido,Picassent}}}$$

Donde:

- $V_{\text{líquido,Poyo}}$ : volumen líquido simulado en la Rambla del Poyo.
- $V_{\text{sólido,Poyo}}$ : volumen sólido simulado en la Rambla del Poyo.
- $V_{\text{líquido,Catarroja}} + V_{\text{líquido,Picassent}}$ : suma de volumen líquido simulado en la Catarroja y Picassent.
- $V_{\text{sólido,Catarroja}} + V_{\text{sólido,Picassent}}$ : suma de volumen sólido simulado en la Rambla del Poyo.

Este enfoque, aunque simplificado, proporciona un marco operativo razonable para la evaluación del transporte de sedimentos durante el evento de crecida de la DANA 2024, especialmente en contextos donde la disponibilidad de datos sedimentológicos detallados es limitada. La anterior relación puede ajustarse para operar de la siguiente manera:

$$\frac{Q_{\text{líquido,Poyo}}}{V_{\text{sedimentos,Poyo}}} = \frac{Q_{\text{líquido,Catarroja}} + Q_{\text{líquido,Picassent}}}{V_{\text{sedimentos,Catarroja}} + V_{\text{sedimentos,Picassent}}}$$

Donde:

- $Q_{\text{líquido,Poyo}}$ : caudal líquido simulado en la Rambla del Poyo.
- $Q_{\text{líquido,Catarroja}} + Q_{\text{líquido,Picassent}}$ : suma de caudal líquido simulado en la Catarroja y Picassent.
- $V_{\text{sedimento,Catarroja}} + V_{\text{sedimento,Picassent}}$ : suma de caudal sólido simulado en la Rambla del Poyo, equivalente a los 29.3 hm<sup>3</sup> previamente calculados

A partir del modelo hidrológico, se obtuvieron que los caudales líquidos en Picassent, Poyo y Catarroja fueron de 55.1, 347.2, y 723.8 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. En ese sentido, el volumen de sedimentos estimados en la Rambla del Poyo, valor que se usó para calibrar el modelo, fue de 13 hm<sup>3</sup> equivalente a 151 m<sup>3</sup>/s de caudal sólido a fecha del 29 de octubre de 2024.

Las condiciones iniciales, es decir, la disponibilidad de sedimentos al inicio de la simulación, ejercen una influencia significativa sobre los resultados obtenidos en la simulación del transporte de sedimentos. En particular, Bussi et al. (2014), destacan

que una incorrecta representación del estado inicial del sistema puede inducir errores relevantes en la estimación de caudales sólidos.

En consideración a este aspecto, se han realizado recirculaciones sucesivas al modelo, con el fin de asegurar la estabilización del sistema (simulación en caliente) y la convergencia de los resultados simulados. La metodología consistió en ejecutar una primera simulación completa para el periodo 1990–2024, y utilizar su estado final como nuevo estado inicial para una segunda simulación (primera recirculación, 1R). Posteriormente, se repitió el procedimiento para una tercera ejecución (segunda recirculación, 2R).

El análisis comparativo entre las recirculaciones reveló que el estado inicial influye de manera significativa sobre los caudales sólidos simulados en gran parte del periodo de modelado. Durante los primeros días de simulación, se observaron errores relativos elevados entre una iteración y otra, con valores que alcanzaron hasta un 218 % respecto a la recirculación anterior. No obstante, a medida que avanza la simulación, estas discrepancias se reducen progresivamente, estabilizándose en un rango de variación entre 0 % y 100 %. La evolución de los errores relativos entre recirculaciones se presenta en la Figura 45, donde se puede apreciar el patrón de convergencia observado entre la primera y segunda recirculación

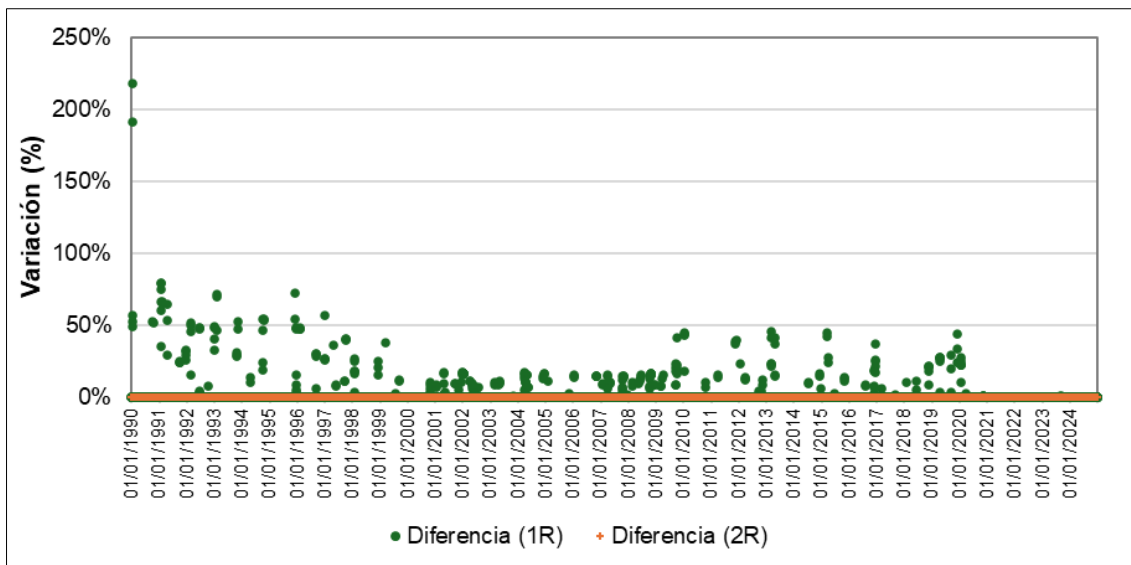


Figura 45. Errores relativos respecto a la simulación anterior – caudales sólidos.

El proceso de calibración del modelo hidro-sedimentológico ha evidenciado que el llenado de los azudes es altamente sensible a los procesos de transporte en ladera y cárcavas. Esta sensibilidad se explica principalmente por el hecho de que las áreas drenantes asociadas a cada azud son inferiores al área umbral para delimitación de cauces, establecida en 15.35 km<sup>2</sup>. En cambio, el área umbral para las cárcavas se fijó en un valor mucho menor (0.01 km<sup>2</sup>), lo que implica que la mayor parte del transporte de sedimentos en estas zonas se produce por escorrentía superficial en cárcavas.

Paralelamente, el volumen total de sedimentos estimado para el evento de la DANA 2024 en el punto de aforo de la Rambla del Poyo (13,0 hm<sup>3</sup>) ha sido empleado como referencia externa para ajustar los parámetros relacionados con el transporte en cauce y ladera. Tras el proceso de calibración, se definieron los siguientes parámetros óptimos para el modelo:

- Transporte en ladera ( $\alpha$ ): 6.3
- Transporte en cárcavas ( $\beta_1$ ): 0.0001
- Transporte en cauce ( $\beta_2$ ): 500

Como se muestra en la Figura 46, el proceso de calibración se centró en el azud P02, utilizando su porcentaje de llenado como indicador de ajuste. Posteriormente, se procedió a realizar una validación espacial del modelo utilizando los otros ocho azudes existentes en el área drenante. Los resultados de la validación muestran, en general, un comportamiento satisfactorio del modelo, logrando reproducir adecuadamente el grado de llenado en cinco de los ocho azudes restantes.

No obstante, se identificaron discrepancias notables en los azudes P05, P06 y P07, donde el modelo presentó una clara sobreestimación del volumen de sedimentos depositados. Esta desviación no parece estar relacionada con el tamaño o capacidad de los azudes, sino más bien con factores ligados a la calidad de la información espacial utilizada. En efecto, estos tres azudes se encuentran localizados dentro de la misma subcuenca del Barranco del Gayo, una zona donde los mapas de pendientes y mapas de producción de sedimentos podrían no estar representando con suficiente fidelidad la heterogeneidad topográfica y geomorfológica del terreno. Por tanto, la sobreestimación detectada en estos tres casos podría deberse a una limitación en la resolución o precisión de los mapas de parámetros.

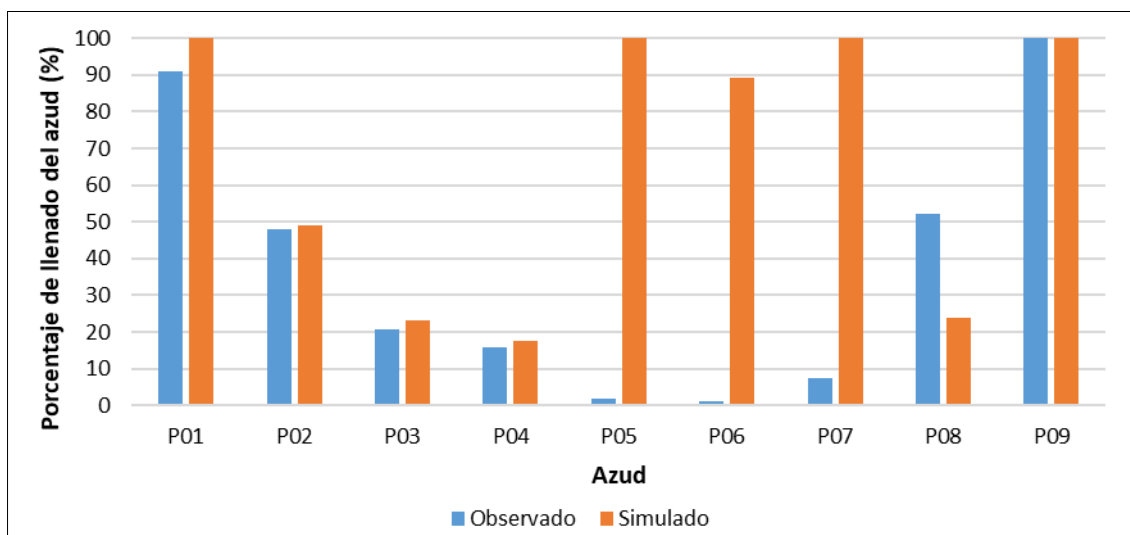


Figura 46. Calibración del modelo de sedimentos – puntos de control en azudes.

Con los valores calibrados previamente, en la Tabla 18 se resumen los principales resultados obtenidos a partir de la simulación de los dos eventos de mayor magnitud

registrados en los últimos 25 años: el evento de octubre de 2000 y el de octubre de 2024 (DANA). Estos eventos fueron seleccionados por su relevancia hidrológica y su capacidad de movilización de sedimentos dentro de la cuenca.

Los resultados muestran diferencias significativas en cuanto a la generación y transporte de sedimentos. En el caso del evento de octubre de 2024, se estima que aproximadamente el 30 % del total de sedimentos generados durante el periodo de simulación se movilizó durante este único episodio. En contraste, el evento de octubre de 2000 aportó un volumen equivalente al 10 % del total.

Tabla 18. Resumen de simulación en los eventos del 2000 y 2024

Variable	Rambla del Poyo	
	Evento 2000	Evento 2024
<b>Q<sub>liq</sub> simulado (m<sup>3</sup>/s)</b>	84.6	347.3
<b>Q<sub>sol</sub> simulado (m<sup>3</sup>/s)</b>	9.5	150.1
<b>Q<sub>total</sub> simulado (m<sup>3</sup>/s)</b>	94.0	497.4
<b>Q<sub>total</sub> observado (m<sup>3</sup>/s)</b>	85.8	475.4
<b>%Sedimentos simulado (Q<sub>sol</sub>/Q<sub>total</sub>)</b>	10%	30%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. Análisis del caudal total simulado

En la realidad, el caudal observado en estaciones de aforo representa la suma del caudal líquido y el caudal sólido transportado por el flujo. En este contexto, se ha realizado un análisis comparativo entre los caudales simulados (líquido y total) y los caudales observados, con el fin de evaluar la mejora en el desempeño del modelo al considerar explícitamente el componente sólido del flujo.

La Tabla 19 muestra los valores del índice de eficiencia de NSE obtenidos en tres etapas del modelo: calibración (1996–2010), validación (2011–2024) y periodo completo de simulación (1990–2024). Se compararon dos configuraciones: una que considera únicamente el caudal líquido simulado y otra que incorpora el caudal total simulado, ambos frente al caudal observado. Los resultados reflejan que la inclusión del componente sólido en el caudal simulado conduce a una mejora general en el ajuste del modelo. Durante el periodo de calibración, el valor de NSE apenas varía (de 0.516 a 0.511), lo que indica una diferencia mínima. Sin embargo, durante la fase de validación se observa una mejora significativa, con el NSE incrementándose de 0.917 a 0.988, esto se debe principalmente al evento de la DANA 2024, cuyo caudal es bastante alto y se logró representarlo de manera más adecuada. Para el periodo completo, el índice de eficiencia también mejora notablemente, pasando de 0,888 a 0.954. El periodo completo, considerando caudal líquido y sólidos simulado, se presenta en la Figura 47.

Tabla 19. Índice de Nash-Sutcliffe del caudal total, caudal líquido y caudal observado

Variable	Rambla del Poyo	
	NSE $Q_{liq,sim}$ vs NSE $Q_{observado}$	NSE $Q_{total,sim}$ vs NSE $Q_{observado}$
Calibración (1996-2010)	0.516	0.511
Validación (2011-2024)	0.917	0.988
Completo (1990-2024)	0.888	0.954

Fuente: Elaboración propia

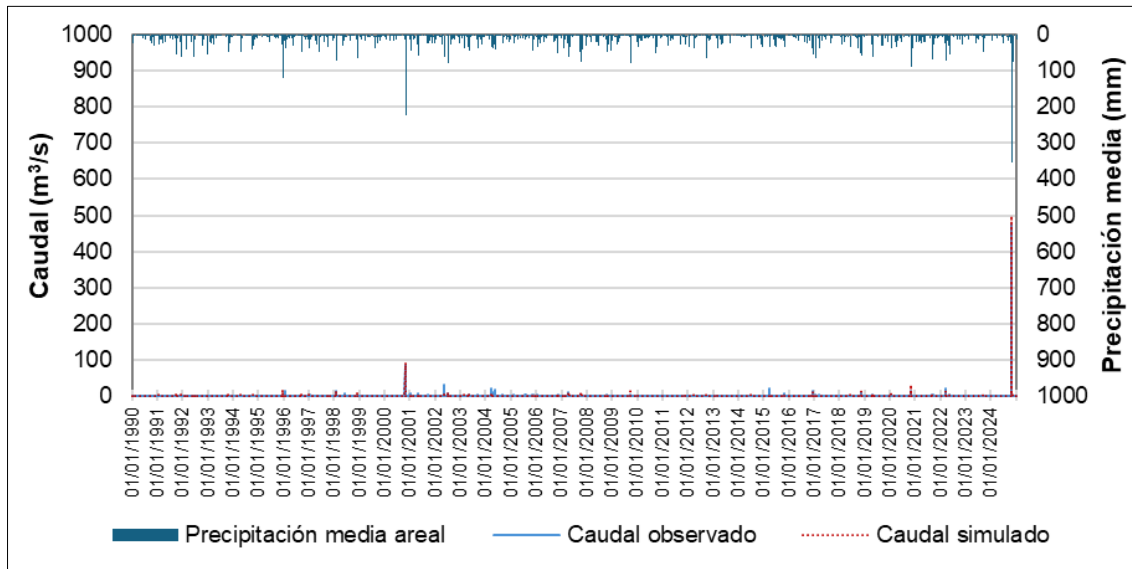


Figura 47. Simulación completa del caudal total a escala diaria (1990-2024).

#### 4.5. Análisis de frecuencia periodo 1920 - 2024

Con el fin de disponer de un periodo extenso de caudales totales simulados, se realizó una simulación empleando toda la información disponible de la AEMET entre 1920 y 2024, a escala diaria, dentro del buffer de 20 km y aplicando los factores de corrección descritos en la Sección 4.2. La localización de los pluviómetros se muestra en la Figura 48, mientras que el detalle de sus coordenadas y la disponibilidad de información se presenta en la Figura 49.



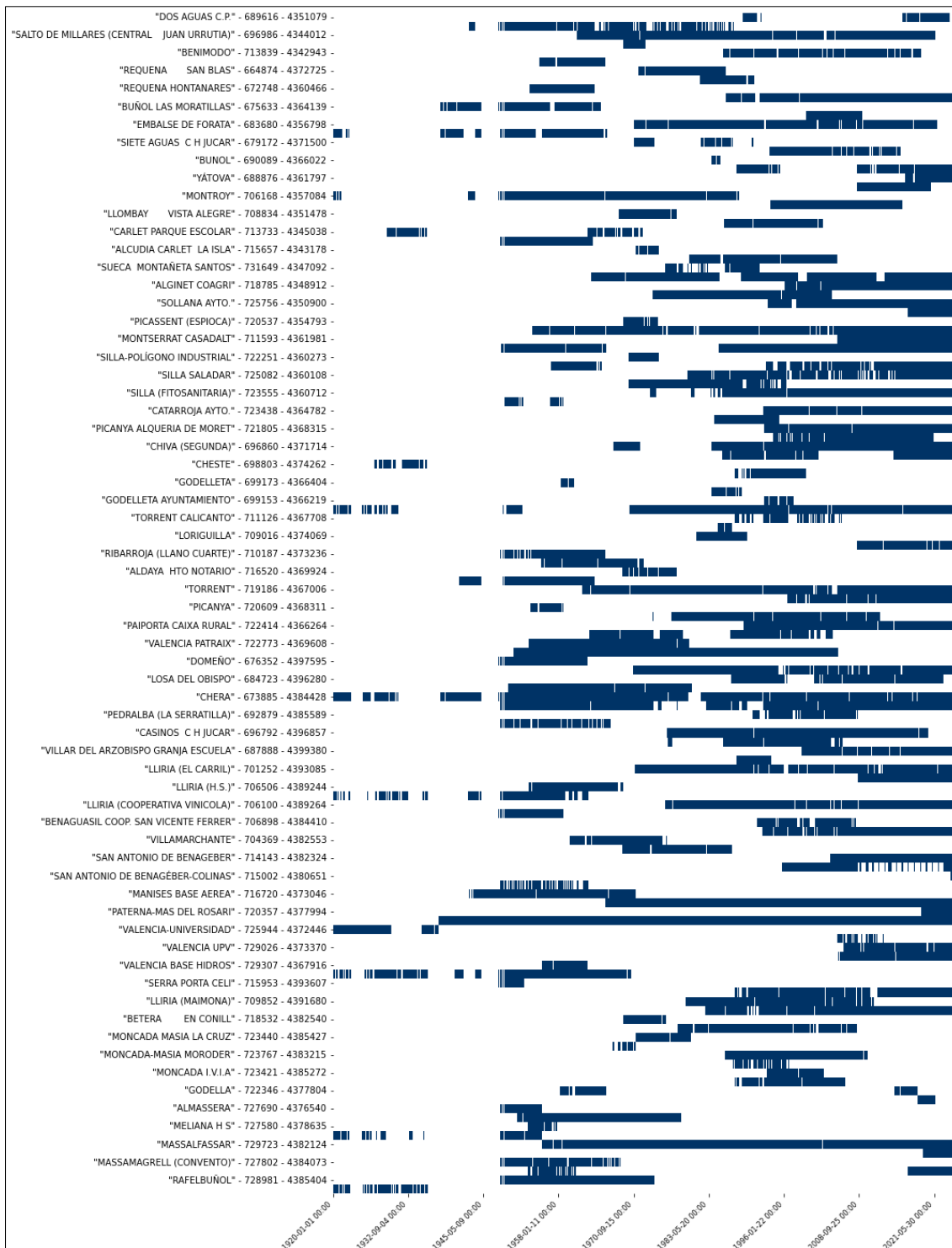


Figura 49. Disponibilidad de información de las estaciones AEMET (1920-2024).

El análisis de frecuencia consistió en seleccionar los caudales máximos anuales de la serie simulada y posteriormente ajustarlos a una distribución de probabilidad. En total, se dispuso de 105 máximos anuales; no obstante, se descartaron aquellos valores inferiores a  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , obteniéndose finalmente 101 datos útiles para el análisis de máximos anuales. Los estadísticos descriptivos correspondientes se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Estadística descriptiva de caudales máximos anuales simulados

Estadística	Valor	Unidades
Tamaño de la muestra	101	--
Rango	553.01	m <sup>3</sup> /s
Media	15.703	m <sup>3</sup> /s
Varianza	3116.3	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>
Desviación estándar	55.824	m <sup>3</sup> /s
Coef. de variación	3.5549	%
Asimetría	9.1367	--
Curtosis	88.168	--
Min	0.12	m <sup>3</sup> /s
25% (Q1)	1.85	m <sup>3</sup> /s
50% (Mediana)	7.51	m <sup>3</sup> /s
75% (Q3)	12.535	m <sup>3</sup> /s
Max	553.13	m <sup>3</sup> /s

Fuente: Elaboración propia

Se empleó el software AFINS 2.0, mediante el cual se estimaron los parámetros de las funciones de distribución utilizando el método de máxima verosimilitud. Se realizaron dos análisis de frecuencia: el primero sin considerar el evento de la DANA de 2024 (100 datos) y el segundo incluyéndolo (101 datos). En ambos casos se evaluaron los ajustes con las distribuciones Gumbel (GU), Valores Extremos de Dos Componentes (TCEV), Generalizada de Valores Extremos (GEV), Log-Normal de dos parámetros (LN2), Log-Gumbel (LGU), Pareto de tres parámetros (GDP) y Exponencial (EXP). La comparación se efectuó siguiendo el criterio de información de Akaike (AIC), que introduce el principio de parsimonia al penalizar el número de parámetros empleados en cada modelo de distribución.

#### 4.5.1. Análisis de frecuencia con DANA 2024

El análisis de frecuencia con DANA 2024 se presenta en la Tabla 21, donde se muestran los valores de la máxima verosimilitud logarítmica y los AIC. Los resultados indican que las mejores funciones de distribución corresponden a LN2 y GDP con valores comparables del AIC, así como cuantiles con órdenes de magnitud similares. Sin embargo, con fines de utilizar la misma función de distribución en el análisis de frecuencia con y sin DANA 2024, se ha escogido la función Log-Normal 2 que presentan cuantiles más coherentes según cada periodo de retorno de interés para ambos análisis de frecuencia. Los parámetros de la función son  $U_y = 1.64336$  y  $S_y = 1.42759$ . Asimismo, dentro de las funciones evaluadas, la seleccionada presentó cierta similitud entre la curva ajustada y la *plotting position* de los datos observados en la Rambla del Poyo (Figura 50).

Tabla 21. Resultados del ajuste de máximos anuales de caudal diario— con DANA 2024

<b>Función</b>	<b>Parámetros</b>				<b>Verosimilitud</b>	<b>Akaike (AIC)</b>
Gumbel	0.0911	1.8315	--	--	-426.4	856.8
TCEV	0.2187	0.0093	2.6696	0.0853	-357.0	722.1
GEV	-5.0604	4829.9	954.5	--	-518.9	1043.8
LogNormal 2	1.6434	1.4276	--	--	-345.2	694.5
Log Gumbel	2.5009	0.6845	--	--	-355.6	715.2
Pareto 3	-0.4649	6.9602	0.0	--	-344.0	694.0
Exponencial	0.0637	0.0	--	--	-379.1	762.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Cuantiles de las funciones de distribución – con DANA 2024

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Cuantil caudal diario máximo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>						
	<b>GU</b>	<b>TCEV</b>	<b>GEV</b>	<b>LN2</b>	<b>LGU</b>	<b>GDP</b>	<b>EXP</b>
5	23.1	13.2	1888870.0	17.2	22.4	16.7	25.3
10	31.3	19.9	--	32.2	67.0	28.7	36.2
25	41.8	78.9	--	63.0	267.6	51.9	50.5
50	49.5	153.8	--	97.1	747.8	77.3	61.4
100	57.1	228.5	--	143.2	2073.9	112.4	72.3
500	74.8	398.7	--	314.9	21903.0	254.2	97.6
1000	82.5	470.6	--	426.2	60340.5	356.6	108.5
5000	100.1	630.2	--	810.2	634006.0	770.3	133.7
10000	107.7	703.0	--	1045.9	1744710.0	1068.9	144.6

Fuente: Elaboración propia

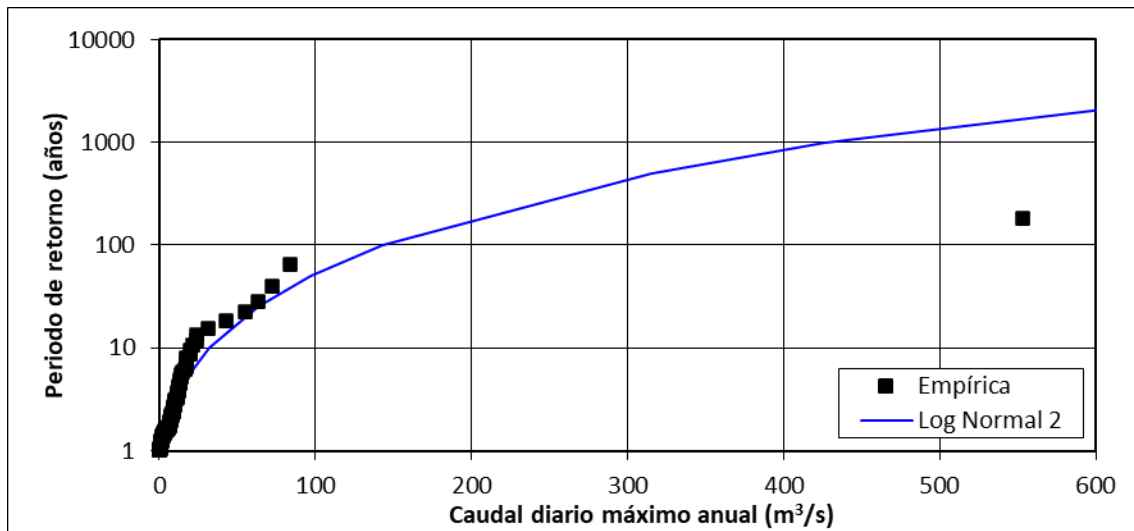


Figura 50. Plotting positions y función de distribución Log-Normal 2 con DANA 2024.

A partir de la distribución seleccionada y de los caudales simulados —incluyendo el evento de la DANA 2024— se estimaron los caudales correspondientes a distintos periodos de retorno, tal como se muestra en la Tabla 23. En particular, considerando que el caudal total simulado durante la DANA 2024 alcanzó un valor de 553.13 m<sup>3</sup>/s, se determinó que este corresponde a un periodo de retorno aproximado de 1878 años (Figura 51).

Tabla 23. Caudales diarios máximos y periodos de retorno –con DANA 2024

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de no excedencia	Caudal diario máximo (m <sup>3</sup> /s)
5	0.8	17.2
10	0.9	32.2
25	0.96	63.0
50	0.98	97.1
100	0.99	143.2
500	0.998	314.9
1000	0.999	426.2
2550	0.99947	553.13 (DANA 2024)
5000	0.9998	810.2
10000	0.9999	1045.9

Fuente: Elaboración propia

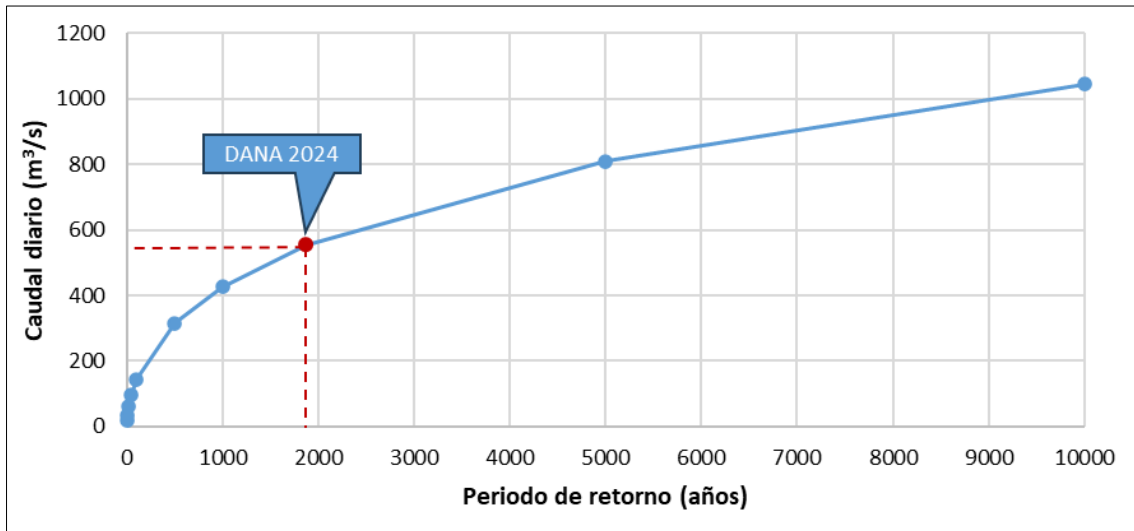


Figura 51. Caudales máximos anuales y periodo de retorno con DANA 2024.

#### 4.5.2. Análisis de frecuencia sin DANA 2024

El análisis de frecuencia sin DANA 2024 se presenta en la Tabla 24, donde se muestran los valores de la máxima verosimilitud logarítmica y los AIC. Los resultados indican que las mejores funciones de distribución corresponden a LN2 y GDP con valores comparables del AIC, así como cuantiles con órdenes de magnitud similares. Sin embargo, con fines de utilizar la misma función de distribución en el análisis de frecuencia con y sin DANA 2024, se ha escogido la función Log-Normal 2 que además presenta cuantiles más coherentes según cada periodo de retorno. Los parámetros de la función son  $U_y = 1.59664$  y  $S_y = 1.35570$ . Asimismo, dentro de las funciones evaluadas, la seleccionada presentó cierta similitud entre la curva ajustada y la *plotting position* de los datos observados en la Rambla del Poyo (Figura 52).

Tabla 24. Resultados del ajuste de máximos anuales de caudal diario– sin DANA 2024

<b>Función</b>	<b>Parámetros</b>				<b>Verosimilitud</b>	<b>Akaike (AIC)</b>
Gumbel	0.1490	2.3021	--	--	-360.9	725.7
TCEV	0.2389	0.0351	2.6390	0.1678	-341.4	690.8
GEV	2.0701	4.6	9.5	--	-1.00E+10	2.00E+10
LogNormal 2	1.5966	1.3557	--	--	-332.0	668.0
Log Gumbel	2.4316	0.6956	--	--	-345.2	694.3
Pareto 3	-0.2419	7.7678	0.0	--	-329.5	664.9
Exponencial	0.0968	0.0	--	--	-333.5	671.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Cuantiles de las funciones de distribución – sin DANA 2024

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Cuantil caudal diario máximo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>						
	<b>GU</b>	<b>TCEV</b>	<b>GEV</b>	<b>LN2</b>	<b>LGU</b>	<b>GDP</b>	<b>EXP</b>
5	15.7	13.0	11.6	15.5	21.0	15.3	16.6
10	20.7	20.0	11.7	28.1	61.8	23.9	23.8
25	27.1	40.4	11.7	53.0	241.5	37.8	33.2
50	31.8	60.3	--	79.9	663.9	50.6	40.4
100	36.5	80.1	--	115.6	1811.6	65.7	47.6
500	47.3	125.4	--	244.3	18426.7	112.3	64.2
1000	52.0	144.2	--	325.7	49949.9	138.6	71.3
5000	62.8	187.1	--	599.5	505513.0	219.9	88.0
10000	67.4	201.4	--	764.0	--	265.9	95.1

Fuente: Elaboración propia

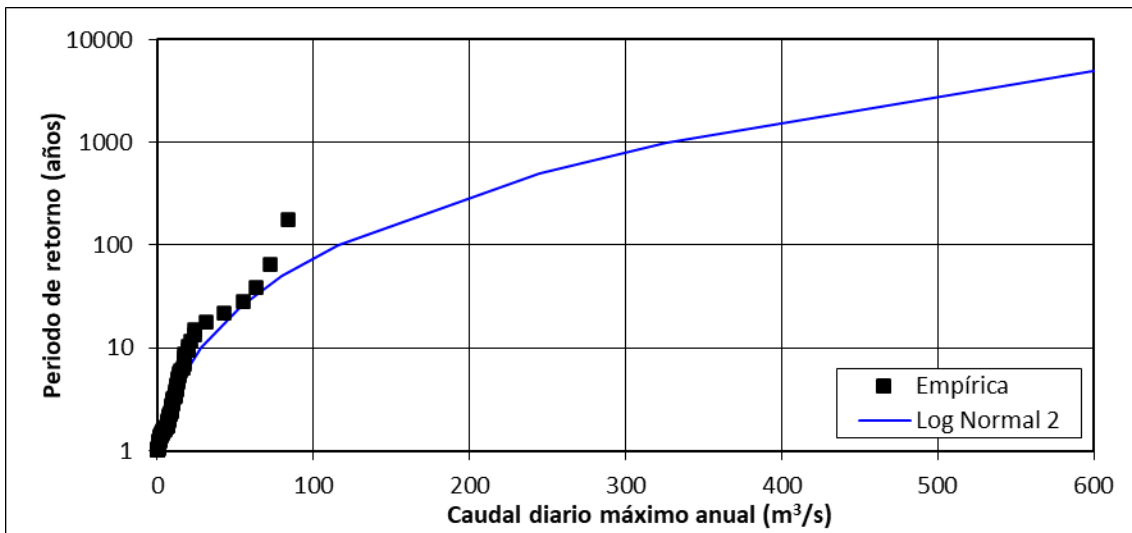


Figura 52. Plotting positions y función de distribución Log-Normal 2 sin DANA 2024.

A partir de la distribución seleccionada y de los caudales simulados —excluyendo el evento de la DANA 2024— se estimaron los caudales correspondientes a distintos periodos de retorno, tal como se muestra en la Tabla 26. En particular, considerando que el caudal total simulado durante la DANA 2024 alcanzó un valor de 553.13 m<sup>3</sup>/s, se determinó que este corresponde a un periodo de retorno aproximado de 4001 años (Figura 53).

Tabla 26. Caudales diarios máximos y periodos de retorno – sin DANA 2024

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de no excedencia	Caudal diario máximo (m <sup>3</sup> /s)
5	0.8	17.2
10	0.9	32.2
25	0.96	63.0
50	0.98	97.1
100	0.99	143.2
500	0.998	314.9
1000	0.999	426.2
4001.01	0.99947	553.13 (DANA 2024)
5000	0.9998	810.2
10000	0.9999	1045.9

Fuente: Elaboración propia

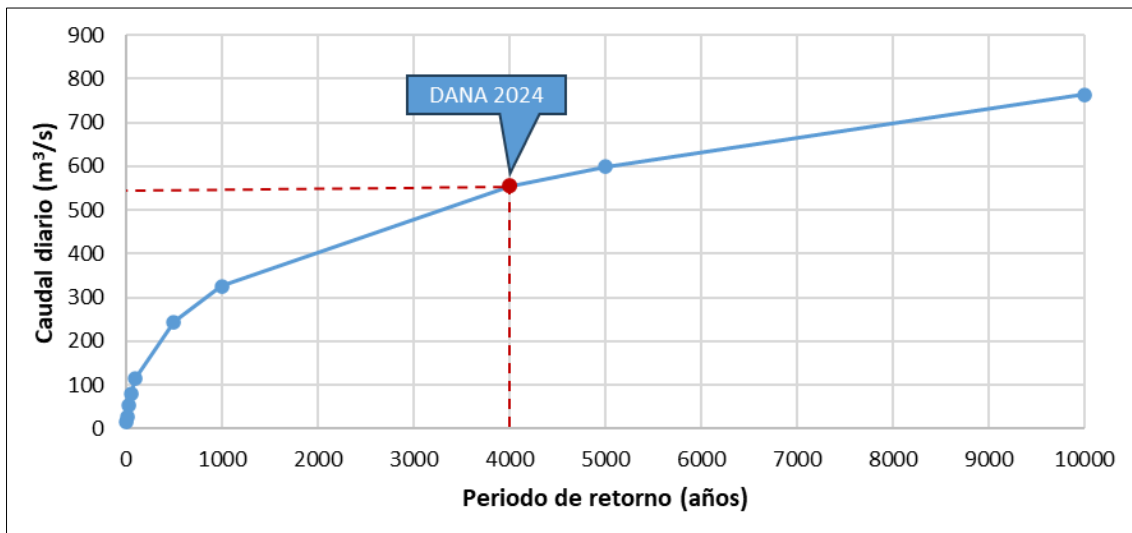


Figura 53. Caudales máximos anuales y periodo de retorno sin DANA 2024.

Del análisis realizado se constató que el evento extremo asociado a la DANA 2024 ejerce una influencia significativa sobre los parámetros de forma y escala de la distribución LogNormal de dos parámetros. Esta alteración en los parámetros se reflejó en variaciones notables de los cuantiles estimados para cada probabilidad de no excedencia y, en consecuencia, en los períodos de retorno. En particular, la inclusión de la DANA 2024, al tratarse de un valor extremo, modificó sustancialmente la representación estadística del régimen de caudales debido al cambio en la desviación estándar, parámetro de forma de la función seleccionada. Como resultado, el período de retorno del caudal analizado se incrementó de 1878 años a aproximadamente 4001 años.

## 5. Implementación del modelo subsidiario

### 5.1. Selección de estaciones y eventos subsidiario

Con el fin de analizar la sensibilidad de la estimación de la precipitación en el modelo TETIS respecto al número y proximidad de estaciones pluviométricas del SAIH-CHJ al área drenante a la Albufera, se llevó a cabo una comparación entre la máxima precipitación calculada por TETIS durante los eventos del 2015, 2020, 2021 y 2022. Para ello, se evaluaron distintas configuraciones de estaciones contenidas en buffers de 0, 5, 15, 20 y 30 kilómetros respecto al área drenante de La Albufera. El caso correspondiente al buffer de 0 km incluyó únicamente aquellas estaciones ubicadas dentro del área drenante.

Tal como se muestra en la Figura 54, los valores de precipitación máxima estimada en TETIS en una hora son idéntica tanto para el conjunto de 19 estaciones (correspondiente a un buffer de 15 km) como para el de 46 estaciones pluviométricas (30 km). Esto indica que el uso de un mayor número de estaciones que se encuentran más lejanas de 15 km al área de interés no aporta con cambios significativos en la estimación de la precipitación máxima del evento, por lo que se preseleccionó el buffer de 15 km como el más adecuado para la representación de la precipitación en la cuenca.

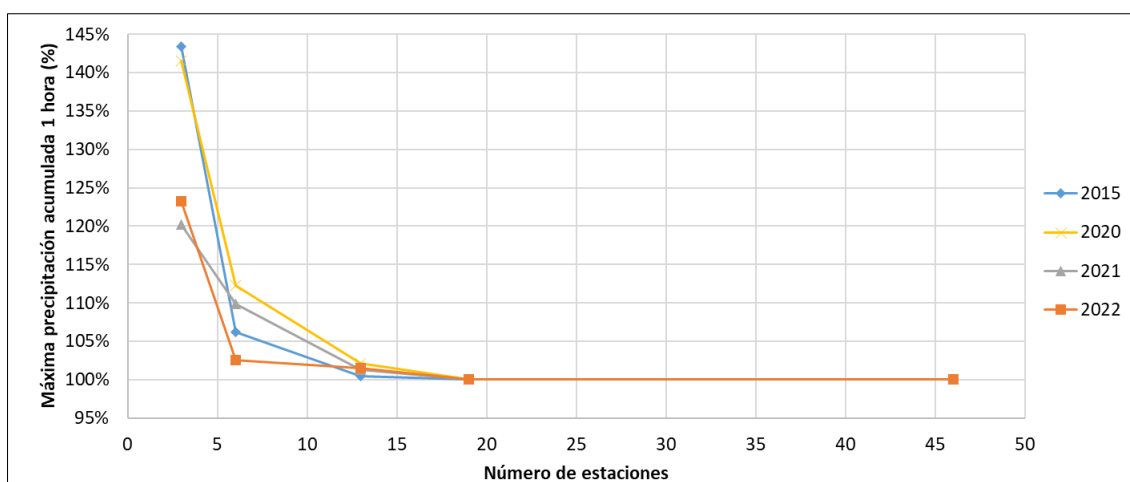


Figura 54. Análisis de influencia de la distancia sobre la máxima precipitación calculada.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.1. Identificación de eventos

El modelo hidro-sedimentológico a escala diaria corresponde a una simulación continua que abarca el período comprendido entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 2024. Este modelo permitió estimar los estados iniciales necesarios para la ejecución de los modelos a escala subdiaria (10 minuta).

En referencia al modelo subdiario, la identificación y selección de eventos para la calibración y validación del modelo hidrológico en TETIS se llevó a cabo a partir del análisis de los eventos históricos registrados en la estación de aforo Rambla del Poyo. Estos datos históricos fueron obtenidos a través del SAIH-CHJ, que dispone de registros desde 1988 hasta la fecha (2024). No obstante, cabe señalar que, tras la DANA ocurrida el 29 de octubre de 2024, los registros de la estación dejaron de ser confiables debido a alteraciones en la geometría del cauce y la avería del sensor, lo que generó cambios significativos en la curva de gasto de la estación foronómica.

La Figura 55 muestra la representación gráfica de los caudales máximos diarios registrados en la estación desde 1988 hasta la actualidad. De manera general, se observan diferencias notables en el comportamiento de los caudales entre los períodos 1988-1997 y 1998-2024. Durante el primer período, se observan caudales en cada día del registro. Este patrón contradice claramente con el observado en años recientes, ya que la Rambla del Poyo se encuentra seca gran parte del año (cuerpo de agua efímero). Por esta razón, se preseleccionó el segundo intervalo para el análisis. Asimismo, la calibración y validación se seleccionaron los eventos cuyos caudales picos superiores fueron superiores a 20 m<sup>3</sup>/s, considerando que estos podrían ser más relevantes para el estudio de avenidas.

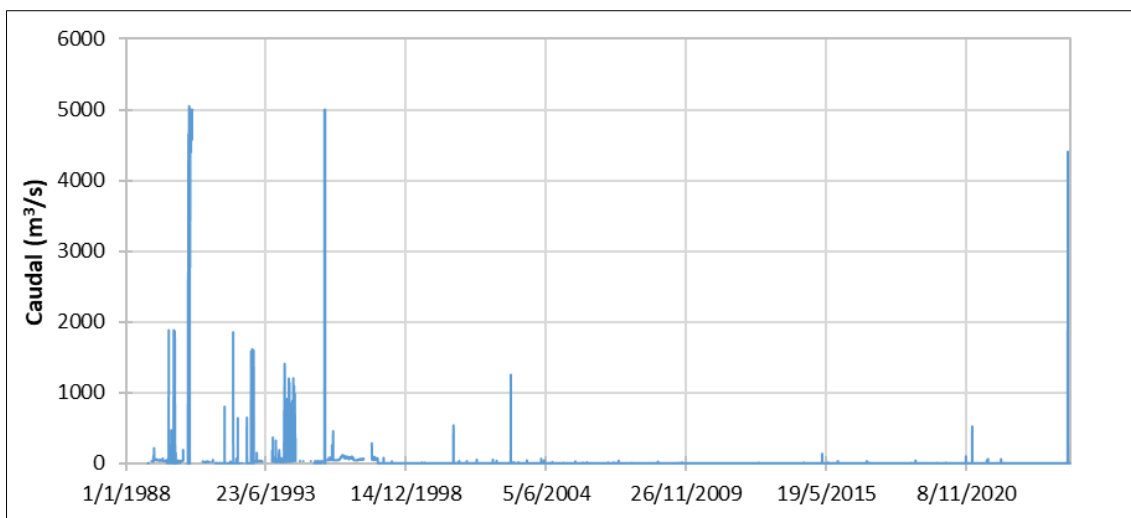


Figura 55. Caudal máximo diario en la estación Rambla del Poyo (1988 - 2024).

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ.

En síntesis, se seleccionados un total de trece (13) eventos hidrológicos para la calibración y validación del modelo. Estos eventos presentaron caudales picos desde un mínimo de 23.62 m<sup>3</sup>/s, registrado en octubre de 2008, hasta un máximo de 524.85 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al evento de octubre de 2000. Cabe señalar que, si bien en esta sección no se incluye expresamente el evento asociado a la DANA de 2024, dicho evento es analizado en detalle en una sección específica en el presente trabajo.

### 5.1.2. Comparación de escalas temporales y caudal pico

Como se mencionó previamente, la resolución temporal disponible en el Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Júcar (SAIH-CHJ) es de 5 minutos. En ese sentido, como el modelo subdiario corresponde a escala 10 minutal, se realizó una comparación entre el caudal pico subdiario y diario. Para ello, se analizó el caudal pico ( $Q_p$ ) agregados y registrados con ambas resoluciones. En el caso de la escala 10 minutal, el valor del caudal corresponde al promedio de los dos registros tomados a intervalos de 5 minutos, mientras que el caudal diario corresponde a la serie de caudales medios diarios. Como se muestra en la Tabla 27, se observa que el caudal pico tiende a disminuir al cambiar la escala temporal desde subdiaria a diaria, debido a un efecto de suavizado en los datos. Esta reducción es, aproximadamente, del orden del 84%. En otras palabras, el caudal pico a escala 10 minutal es aproximadamente 5.6 veces el caudal medio diario. La dispersión entre ambas variables se ve reflejada en la Figura 56.

Tabla 27. Comparación de caudales pico ( $m^3/s$ ) a diferente escala temporal

Eventos		Subdiaria ( $m^3/s$ )	Diaria ( $m^3/s$ )
Evento	Fecha		
Octubre 2000	22/10/2000	413.7	85.8
	23/10/2000	204.9	24.4
	24/10/2000	524.8	82.5
Septiembre 2001	20/09/2001	46.0	3.3
Julio 2005	28/07/2005	26.4	2.0
Abril 2007	07/04/2007	38.4	0.3
Octubre 2008	20/10/2008	23.6	2.2
Marzo 2015	24/03/2015	139.5	20.4
Noviembre 2015	02/11/2015	32.0	5.0
Diciembre 2016	17/12/2016	14.2	4.2
	19/12/2016	30.4	13.5
Noviembre 2018	15/11/2018	18.9	3.6
	16/11/2018	23.9	9.6
	17/11/2018	39.9	3.7
Noviembre 2020	05/11/2020	96.6	13.9
Septiembre 2021	16/09/2021	64.4	3.9
Marzo 2022	22/03/2022	57.6	21.5

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ

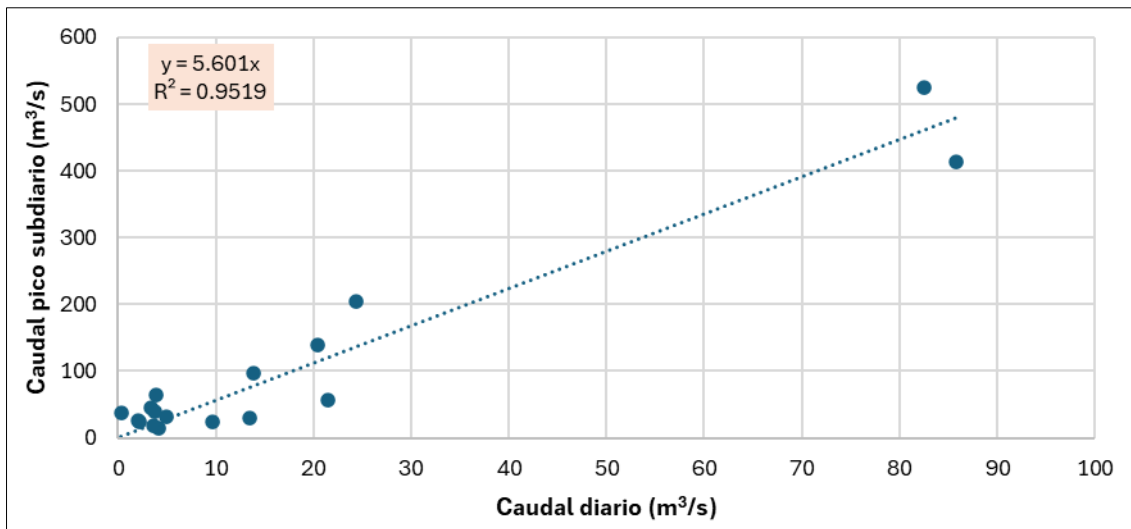


Figura 56. Correlación entre caudal medio diario y caudal pico 10 minutil.

Fuente: Elaboración propia con datos del SAIH-CHJ.

## 5.2. Calibración del modelo subdiario

Uno de los principales retos en la simulación a escala subdiaria consiste en establecer un estado inicial adecuado. Este desafío puede abordarse aprovechando que se dispone de un modelo continuo a escala diaria, el cual permite describir el estado de los tanques de almacenamiento en un día específico dentro del periodo 1990–2024.

No obstante, es importante considerar que tanto el modelo diario (ver Sección 4.2 y 4.3) como el modelo subdiario implementado en la presente sección utilizan factores correctores distintos. En particular, el tanque de almacenamiento estático (tanque T1), que representa el almacenamiento capilar del suelo, difiere significativamente entre ambos modelos, lo que implica una dinámica distinta en el balance hídrico según la escala de simulación.

Frente a esta situación, en el presente trabajo se adoptó la siguiente metodología para la calibración del modelo subdiario, empleando como caso de estudio el evento de la DANA de 2024:

- Ejecutar el modelo subdiario utilizando inicialmente los factores correctores derivados del modelo diario, junto con el estado de humedad antecedente (Hantec) estimado por dicho modelo diario.
- Mantener fijo el factor corrector del almacenamiento estático (FC1) y proceder a la calibración del resto de parámetros, con énfasis en el factor de la infiltración (FC3) y propagación (FC9).
- Evaluar el rendimiento del modelo y verificar si los factores correctores se encuentran en un rango aceptable.
- En caso de que los factores correctores empleados no generen resultados satisfactorios, modificar el FC1 del modelo diario y volver a ejecutarlo para recalculer el nuevo estado de humedad antecedente (Hantec). Con este nuevo

valor de FC1, reiniciar la simulación subdiaria y reajustar el resto de los parámetros.

- En caso de que los factores correctores empleados generen resultados satisfactorios, reajustar el resto de los factores correctores hasta lograr un ajuste final adecuado.

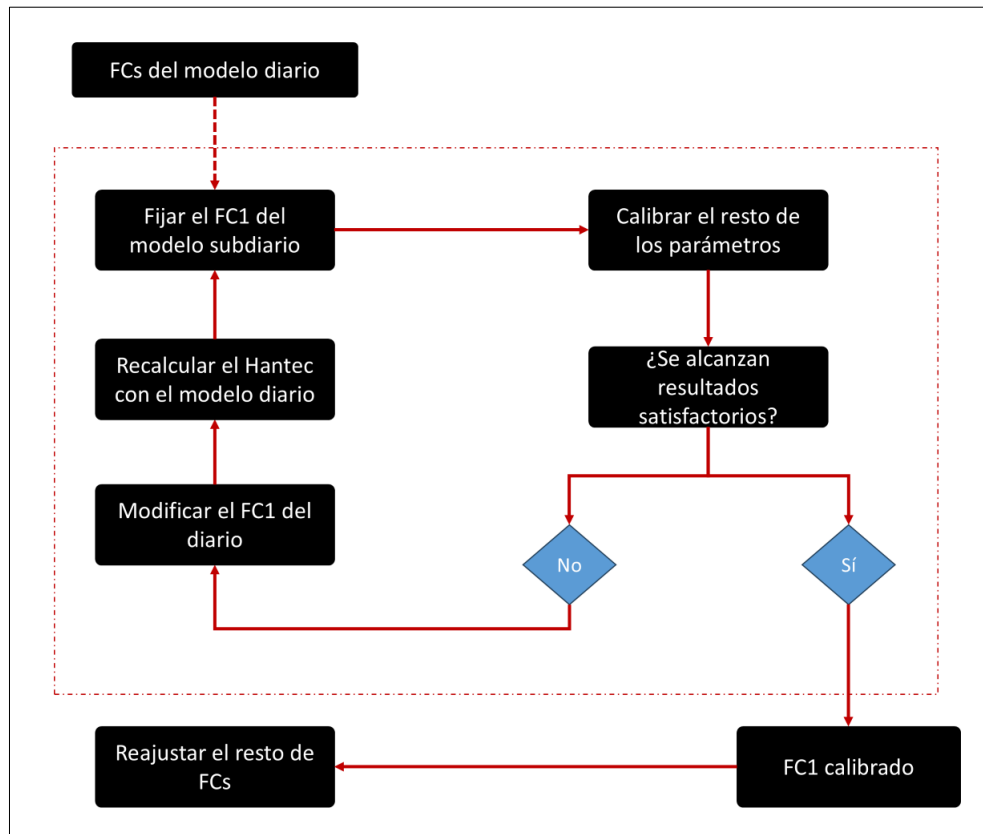


Figura 57. Diagrama de calibración iterativa del FC1 entre modelo diario y subdiario.

Finalmente, tras varias iteraciones orientadas a obtener factores correctores adecuados para el modelo hidrológico (caudales líquidos), en la Tabla 28 se presenta el conjunto de FCs con el que se alcanzó el mejor ajuste.

Tabla 28. Factores correctores empleados en el modelo hidrológico a escala subdiaria

Factor de corrección	Descripción	Valor
FC1	Almacenamiento estático	2.18
FC2	Evapotranspiración	1.00
FC3	Infiltración	2.05
FC4	Escorrentía directa	1.00
FC5	Percolación	150.00
FC6	Interflujo	1.00
FC7	Flujo subterráneo profundo	150.00
FC8	Flujo base	0.00
FC9	Velocidad en red fluvial	0.135

Fuente: Elaboración propia

Respecto al modelo de sedimentos a escala subdiaria, el estado inicial (Sedantec) se definió a partir de la recirculación del estado final hasta lograr la convergencia de los caudales sólidos simulados y un valor próximo al volumen estimado en la Sección 4.3 (13 hm<sup>3</sup>). Asimismo, con el propósito de reducir la complejidad en la calibración, se asumió que los parámetros asociados al transporte de sedimentos en laderas, cárcavas y cauces ( $\alpha$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ ) presentan valores equivalentes. El valor obtenido para los parámetros de sedimentos asciende a 0.285.

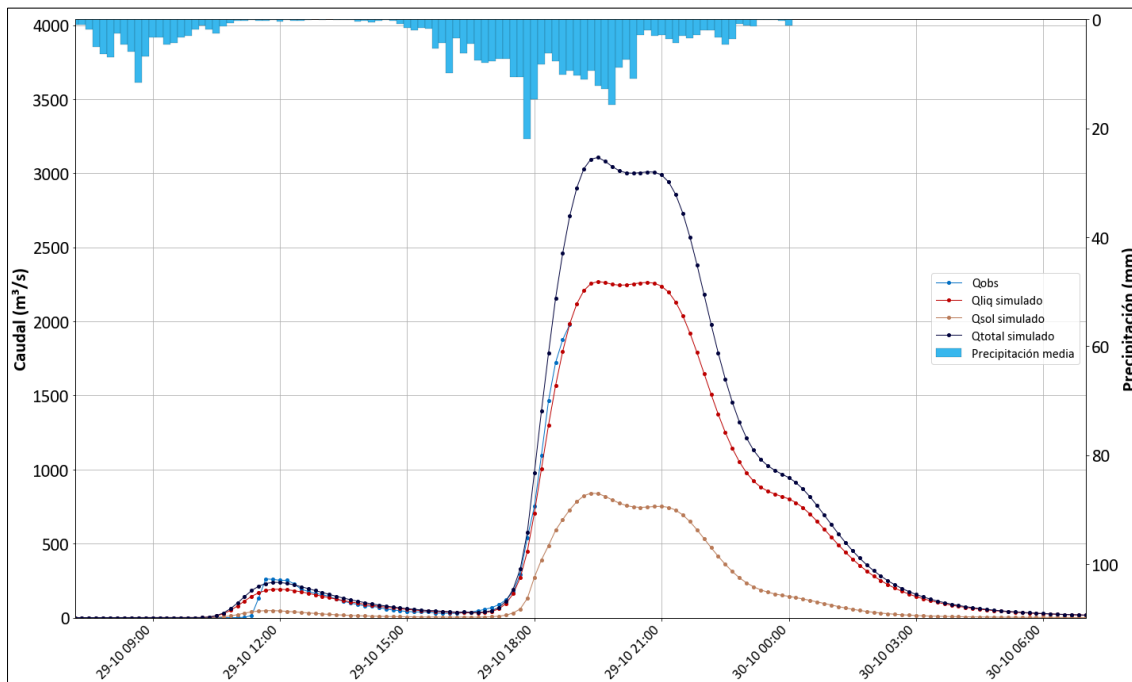


Figura 58. Calibración del modelo subdiario – evento de la DANA 2024.

Como se aprecia en la Figura 58, los caudales totales simulados —que incluyen tanto la componente líquida como la sólida— presentan un buen ajuste respecto a los caudales observados, alcanzando un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.89. El caudal máximo de la primera onda de crecida es reproducido adecuadamente por la simulación, con un valor de 237.8 m<sup>3</sup>/s registrado a las 11:50 del 29 de octubre de 2024. En relación con la segunda onda, la simulación representa de forma satisfactoria

el tramo ascendente del hidrograma; sin embargo, en la fase final se observa una discrepancia respecto a los datos observados. Esta diferencia podría deberse a una subestimación de los caudales medidos, asociada a procesos de socavación en la sección donde se encuentra instalado el sensor, los cuales habrían modificado la curva de gasto. El caudal pico simulado asciende a  $3106.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , ocurrido a las 19:30 del mismo día.

Un análisis complementario se centró en la estimación del porcentaje de sedimentos transportados durante el evento de la DANA 2024, a partir de los caudales sólidos y totales simulados. La Figura 59 muestra la evolución temporal de la contribución de sedimentos en el caudal total. El porcentaje de sedimentos varió entre 4 % y 28 %, mientras que, para el volumen total del evento, la proporción de sedimentos alcanzó un 23 %, magnitud comparable con el modelo diario (30% de sedimentos en volumen).

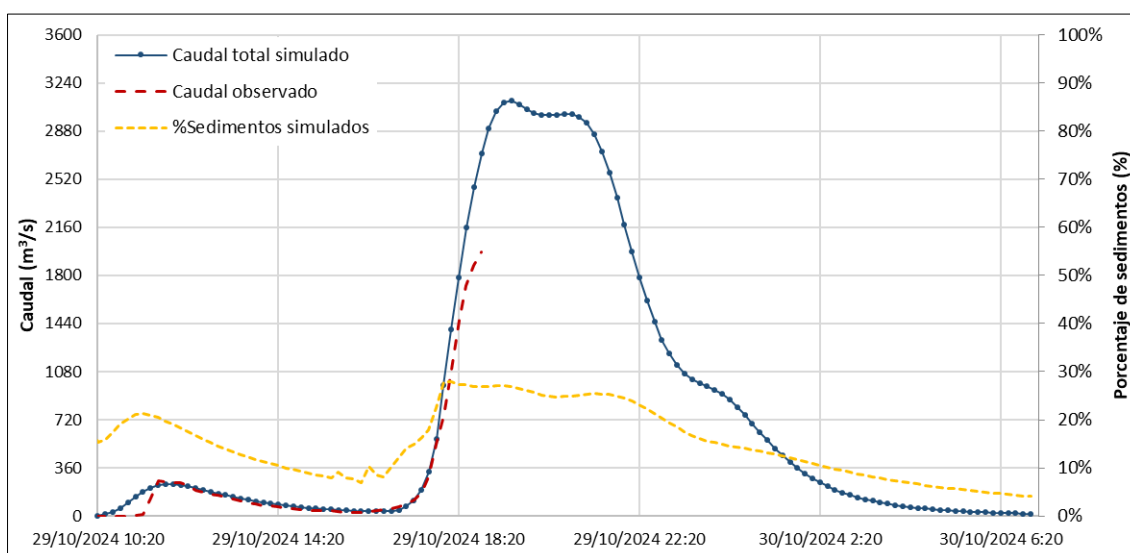


Figura 59. Evolución temporal de la contribución de sedimentos al caudal total – DANA 2024.

### 5.3. Validación del modelo subdiario

La cuenca de la Rambla del Poyo cuenta con una única estación de aforo, lo que impide realizar una validación espacial del modelo hidrológico implementado. Como se mencionó en la sección anterior, en la calibración del modelo subdiario se emplearon 19 estaciones pertenecientes a las redes SAIH, AVAMET y AEMET. Sin embargo, la utilización de estas fuentes, sumada a las limitaciones propias de la disponibilidad de información hidrometeorológica, constituye una restricción para la validación temporal del modelo, debido a las siguientes razones:

- No se dispone de registros de las redes SAIH, AVAMET y AEMET para eventos anteriores a la DANA 2024.
- A medida que se analizan eventos más antiguos, la disponibilidad de información se reduce por la inexistencia de estaciones en esas fechas.

Como consecuencia, la interpolación de precipitaciones y su representatividad espacial se vieron comprometidas, lo que repercutió en el rendimiento del modelo hidrológico.

No obstante, con fines de análisis, se llevó a cabo una validación temporal utilizando únicamente estaciones de la red SAIH, siendo cinco (05) las finalmente consideradas en el proceso.

En la Tabla 29 se presenta un resumen de los índices de NSE de los eventos de validación que contraste el caudal observado y el caudato total simulado (suma del caudal líquido y sólido). De los 13 eventos de validación, ocho (08) de ellos presentaron un desempeño insatisfactorio ( $NSE \leq 0.5$ ), dos (02) de ellos presentaron un desempeño satisfactorio ( $0.5 < NSE \leq 0.65$ ), y el resto presentó un desempeño muy bueno ( $0.75 < NSE$ ). Vale precisar que si bien se están usando cinco (05) estaciones del SAIH, en los eventos del 2000 y 2001 la estación Chiva no existía. Entre las Figura 60 y Figura 71 se ilustran los eventos empleados en la validación.

Tabla 29. NSE en los eventos de validación (caudal total simulado - caudal observado)

Evento	NSE (Qtotal simulado vs Qobservado)
Octubre 2000	0.52
Septiembre 2001	-0.06
Julio 2005	-0.09
Abril 2007	-0.61
Octubre 2008	0.45
Marzo 2015	-17.78
Noviembre 2015	0.76
Diciembre 2016	-30.33
Noviembre 2018	0.33
Noviembre 2020	0.56
Septiembre 2021	-0.03
Marzo 2022	0.77

Fuente: Elaboración propia

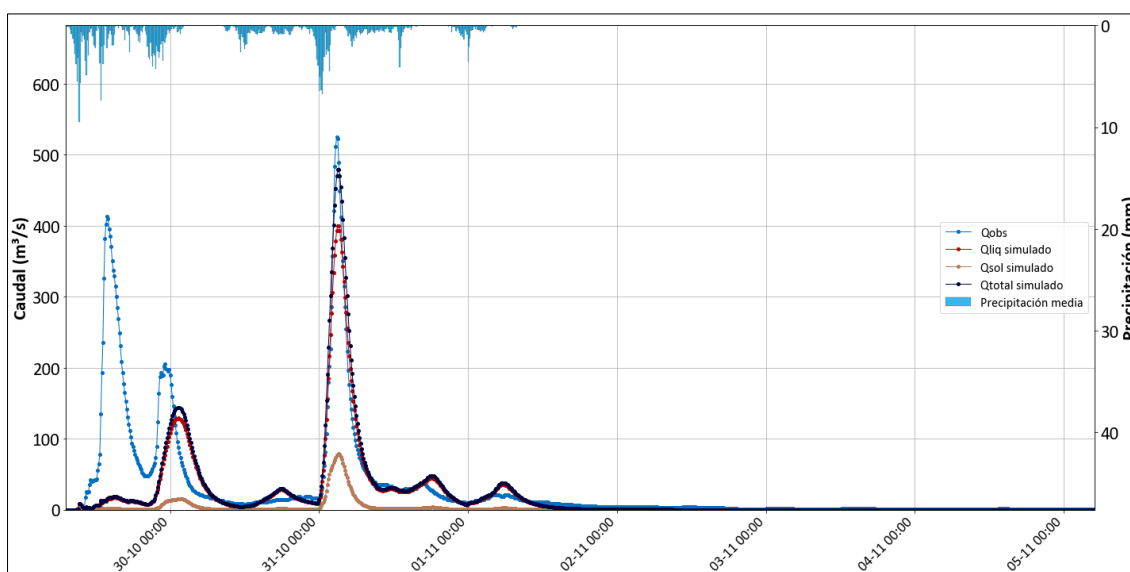


Figura 60. Validación temporal con el evento de octubre 2000.

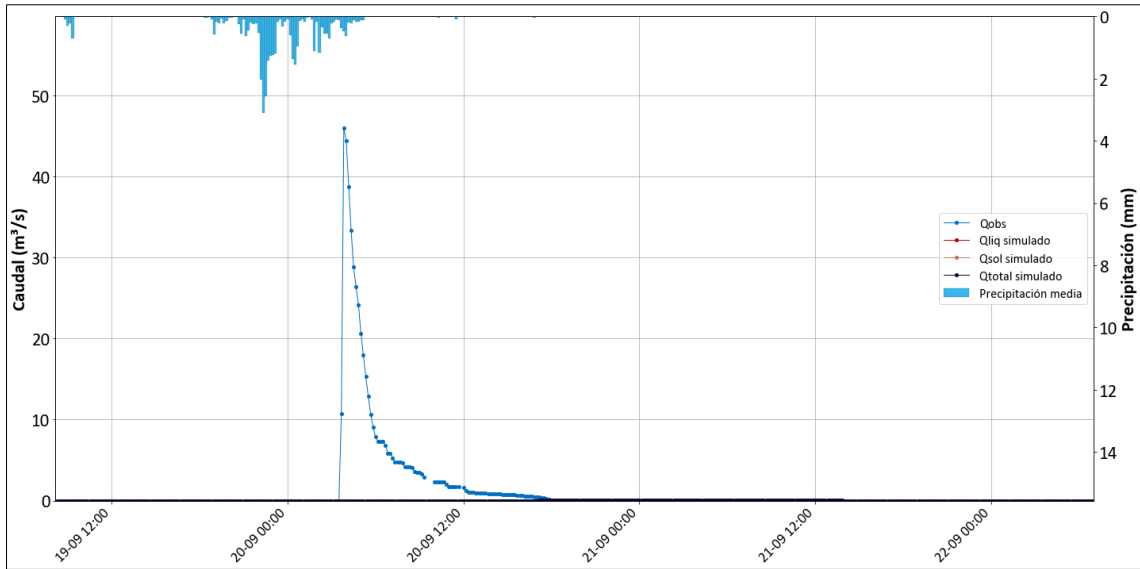


Figura 61. Validación temporal con el evento de septiembre 2001.

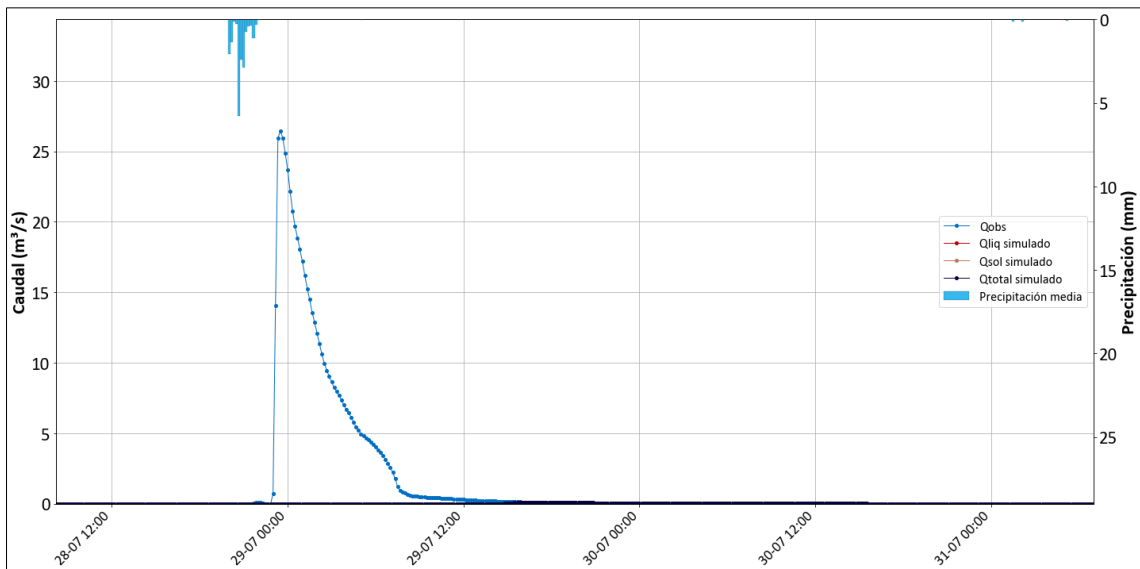


Figura 62. Validación temporal con el evento de julio 2005.

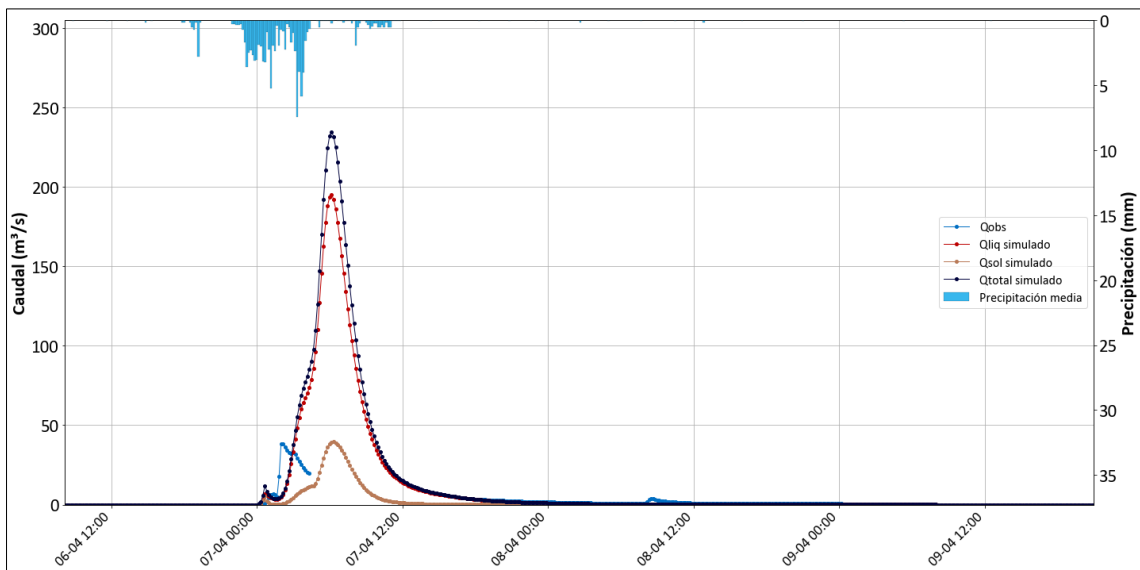


Figura 63. Validación temporal con el evento de mayo 2007.

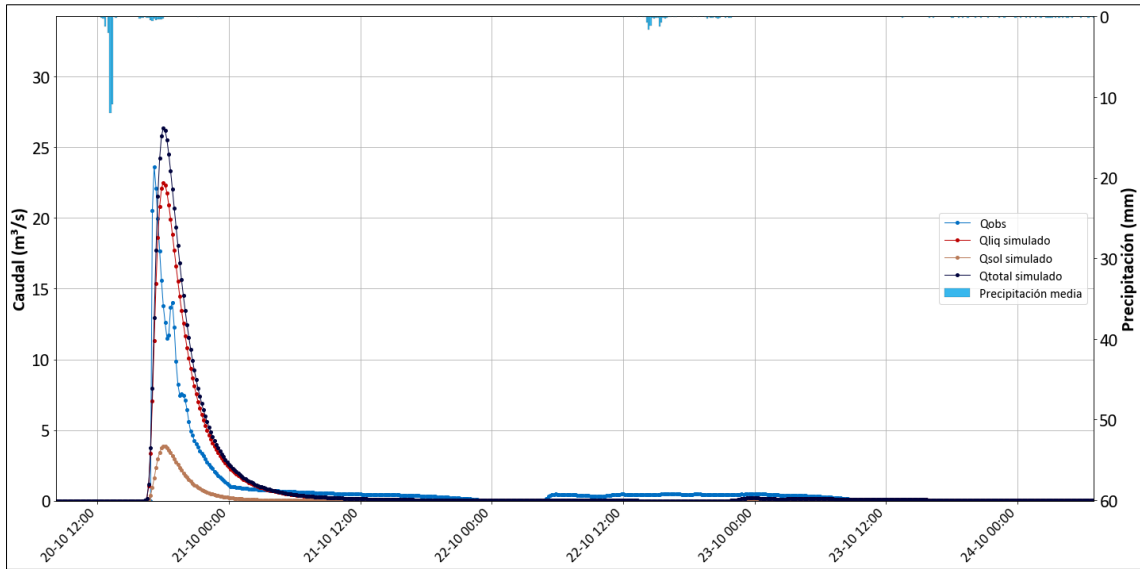


Figura 64. Validación temporal con el evento de octubre 2008.

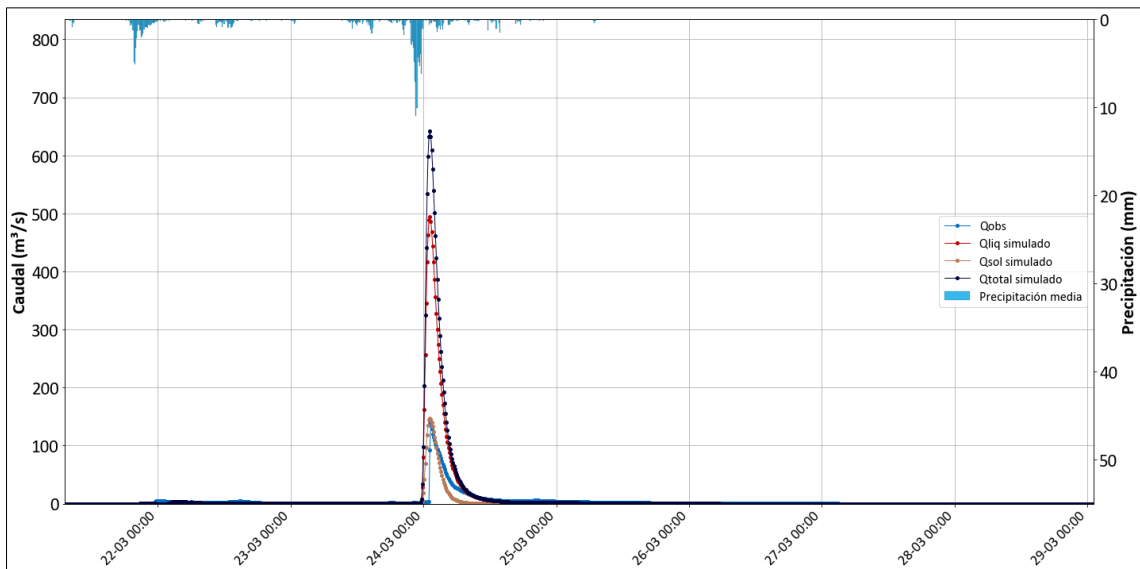


Figura 65. Validación temporal con el evento de marzo 2015.

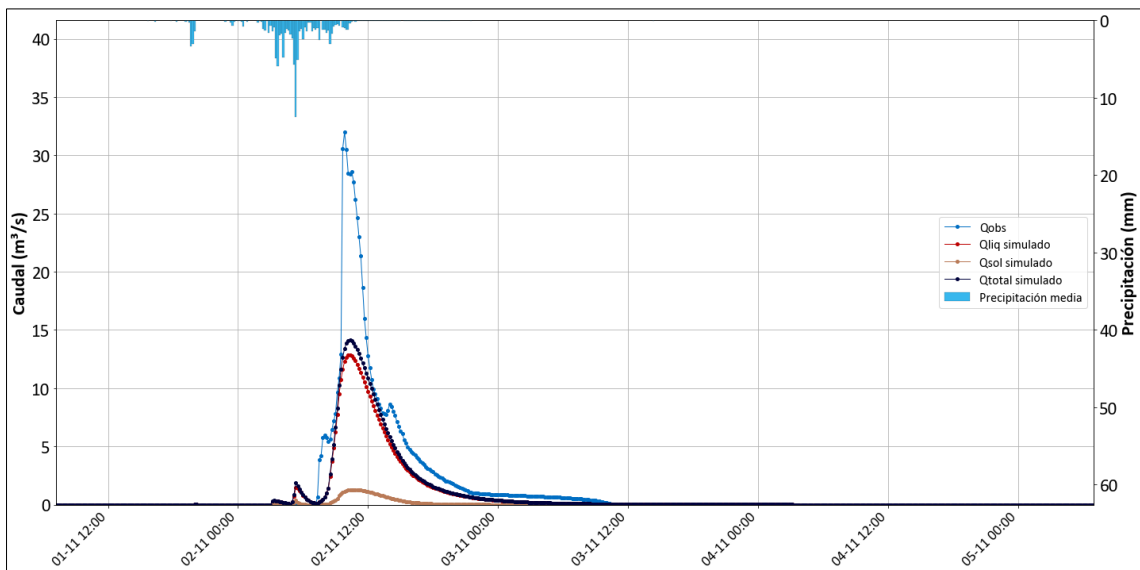


Figura 66. Validación temporal con el evento de noviembre 2015.

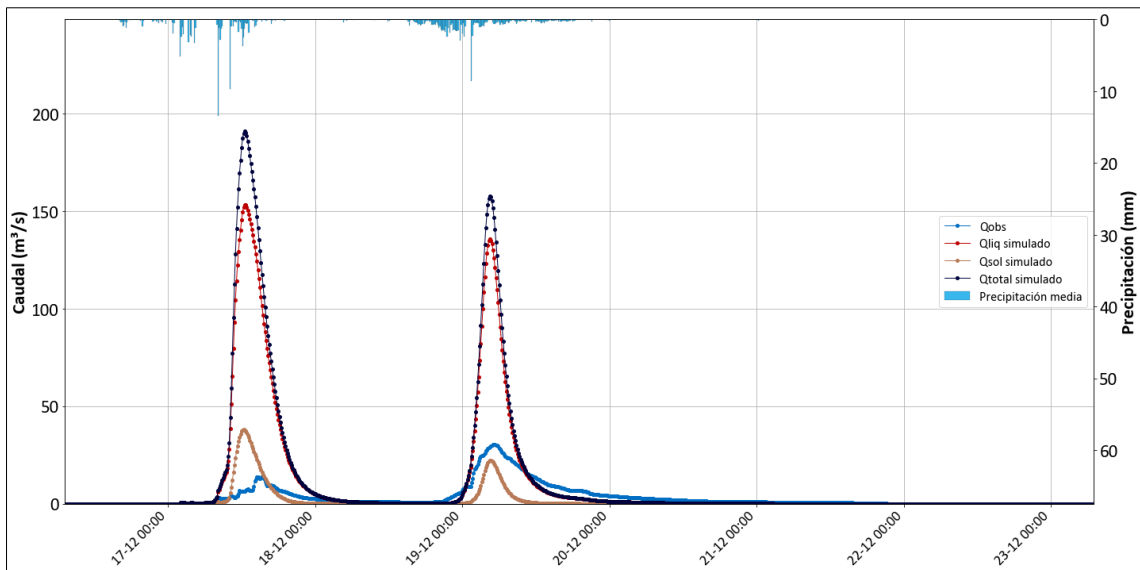


Figura 67. Validación temporal con el evento de diciembre 2016.

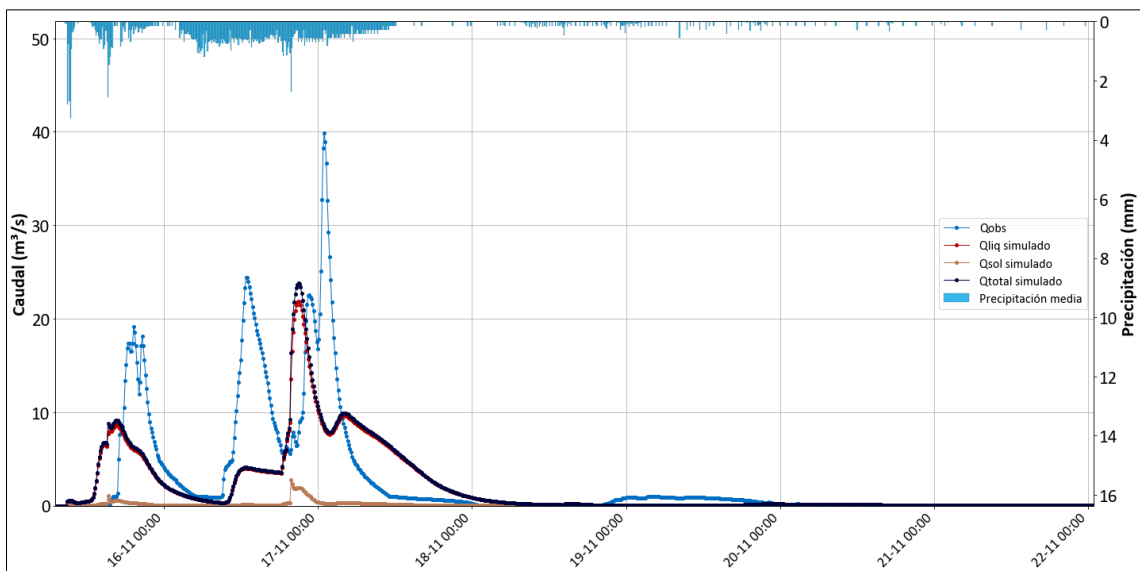


Figura 68. Validación temporal con el evento de noviembre 2018.

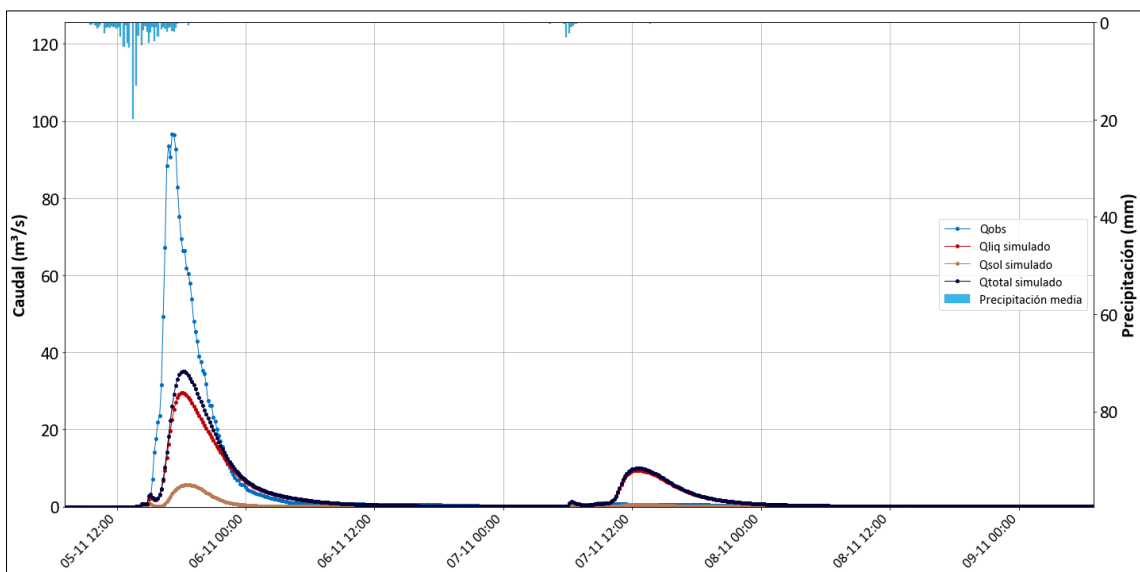


Figura 69. Validación temporal con el evento de noviembre 2020.

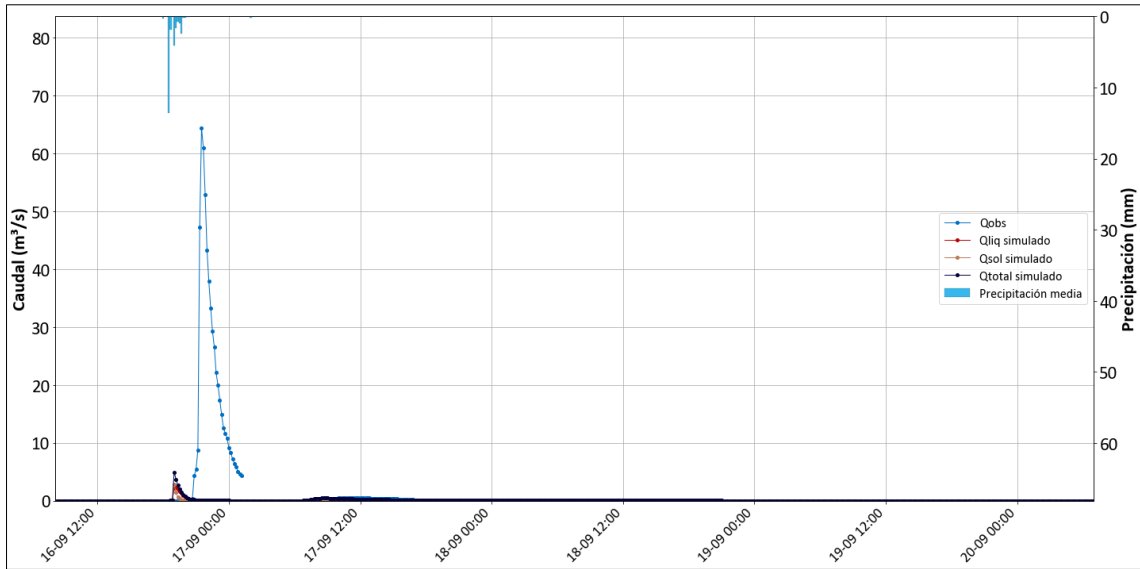


Figura 70. Validación temporal con el evento de septiembre 2021.

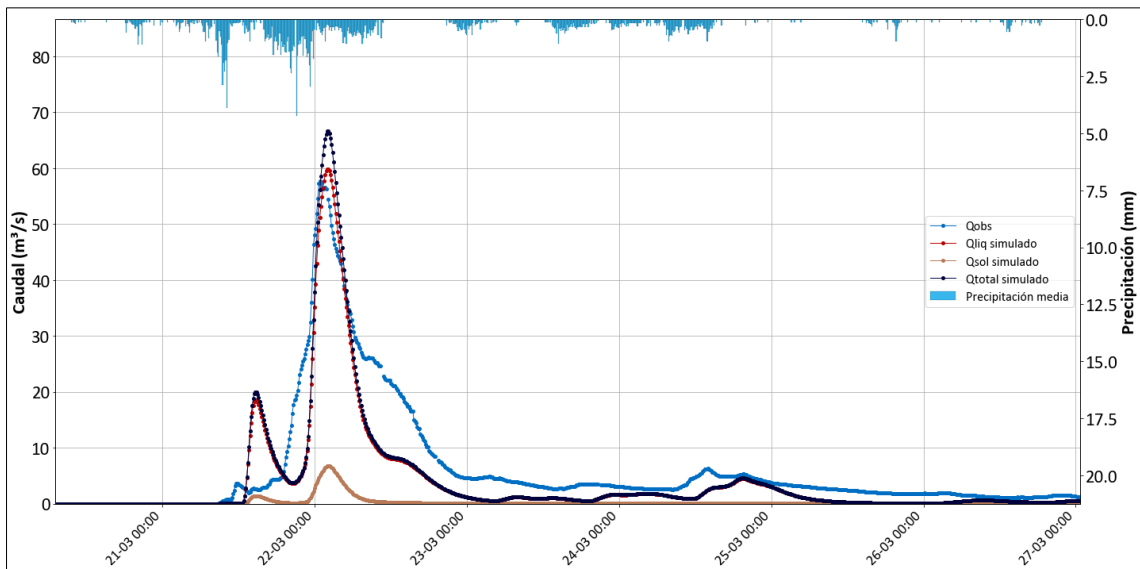


Figura 71. Validación temporal con el evento de marzo 2022.

De las validaciones realizadas, el evento del año 2000 resulta de particular importancia debido a la magnitud de los caudales observados. Si bien el modelo implementado no logra reproducir adecuadamente la primera onda de crecida, las ondas posteriores son representadas de manera satisfactoria.

En la Figura 72 se muestra la variabilidad del porcentaje de sedimentos transportados durante este evento. En los primeros minutos, dicho porcentaje presenta una elevada fluctuación, probablemente asociada a las condiciones iniciales del modelo. En términos generales, el porcentaje de sedimentos osciló entre 2 % y 18 %, mientras que, para el volumen total del evento, la proporción alcanzó un 11 %. Este valor es muy próximo al estimado mediante el modelo diario, lo que constituye un respaldo adicional a la validez del modelo implementado.

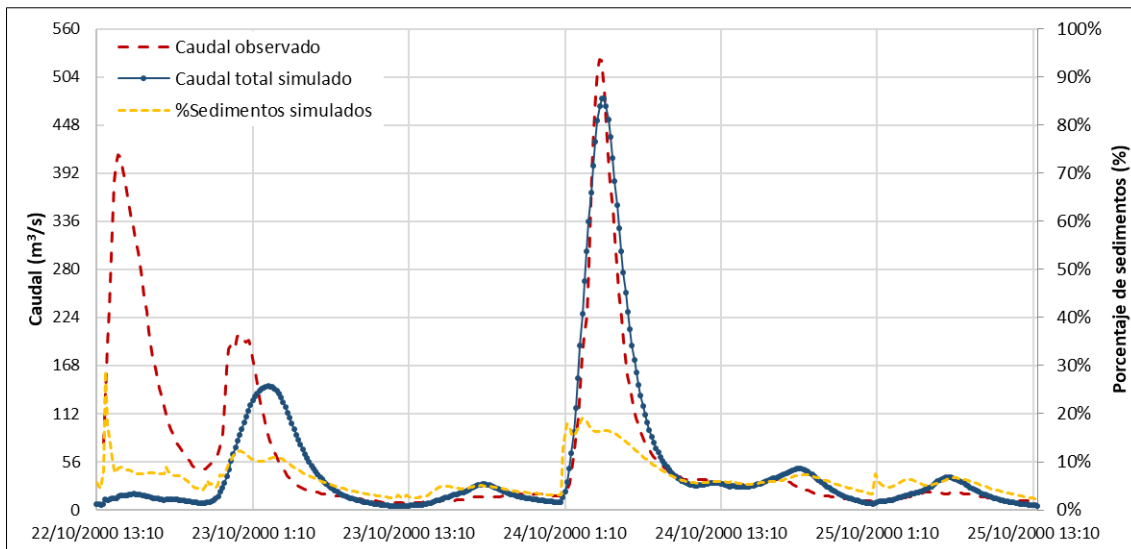


Figura 72. Evolución temporal de la contribución de sedimentos al caudal total – evento 2000.

#### 5.4. Histéresis

La histéresis constituye una herramienta útil para analizar la relación no lineal entre el caudal líquido y el caudal sólido durante eventos de avenida. En este trabajo se han seleccionado el evento de calibración (DANA 2024) y algunos eventos de validación con un comportamiento representativo (octubre de 2000, octubre de 2008 y marzo de 2022).

La DANA 2024 se caracteriza por un hidrograma con dos ondas diferenciadas Figura 73, que dan lugar a bucles de histéresis múltiples en sentido horario. En la primera onda los caudales líquidos oscilan entre 0 y 191.9 m<sup>3</sup>/s, mientras que alcanzan valores entre 0 y 47.1 m<sup>3</sup>/s. Este primer tramo presenta un ciclo de histéresis en sentido horario con apertura amplia (bucle ancho) como se muestra en la Figura 74. Dicho comportamiento refleja una disponibilidad de sedimentos limitada, que disminuye conforme progresa el evento. La amplitud del bucle indica que la reducción de sedimentos erosionables es más acentuada, lo que se traduce en un marcado contraste entre las fases ascendente y descendente.

En la segunda onda del evento (Figura 73), los caudales líquidos varían entre 191.9 y 2269.0 m<sup>3</sup>/s y los sólidos entre 47.1 y 840.2m<sup>3</sup>/s. En este caso, se observa un ciclo de histéresis horario de apertura reducida. Este comportamiento indica que la disponibilidad de sedimentos es limitada y tiende a disminuir conforme progresa el evento. Al tratarse de un bucle angosto, la reducción de sedimentos no es inmediata, sino progresiva, lo que se traduce en que, durante la fase descendente, el caudal sólido decrece a pesar de que el caudal líquido presente valores similares a los de la fase ascendente. Cabe destacar que, en esta segunda onda, el caudal líquido presenta un tramo con caudales cuasi-constante en el hidrograma. El primer pico coincide con el máximo del caudal sólido; posteriormente, pese a que el caudal líquido alcanza una magnitud comparable, la curva de histéresis muestra un descenso casi vertical. Esto pone de manifiesto que la capacidad de transporte de sedimentos estuvo controlada

principalmente por la disponibilidad de material, más que por la magnitud del caudal líquido.

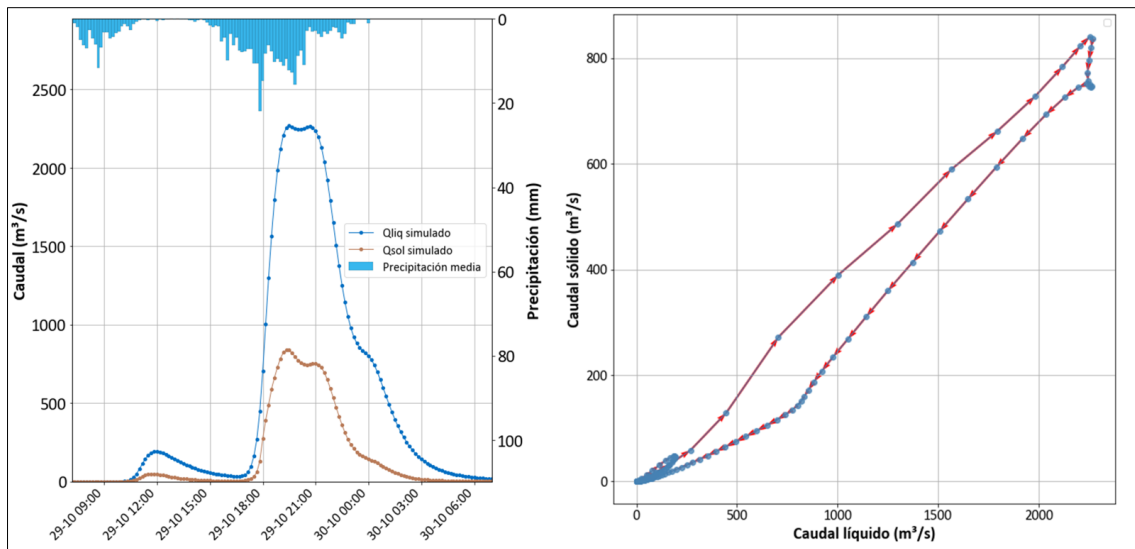


Figura 73. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento DANA 2024.

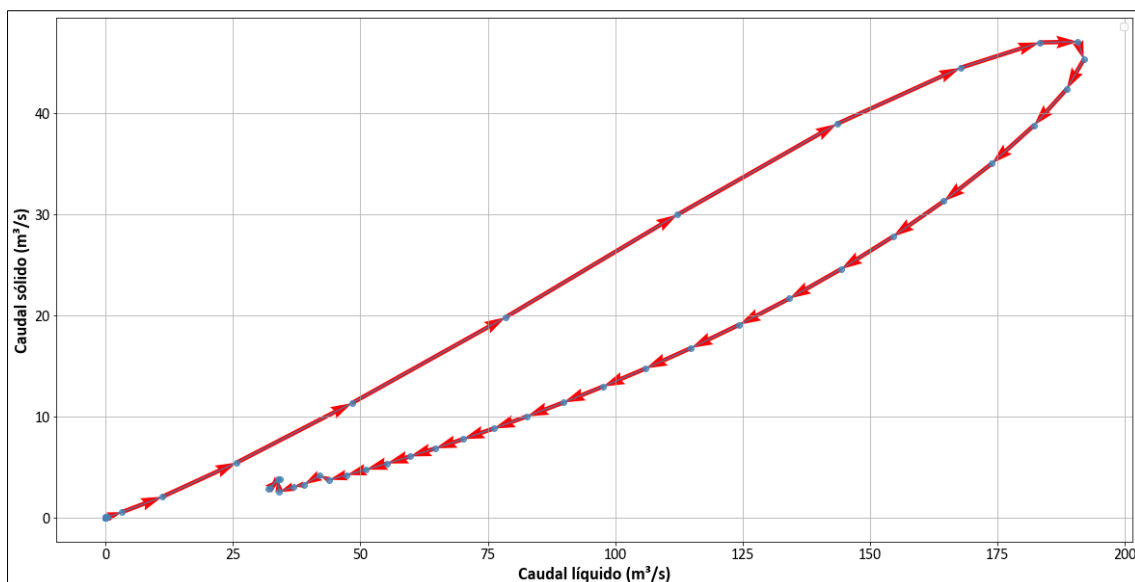


Figura 74. Histéresis de la primera onda del evento DANA 2024.

El evento de octubre de 2000 presenta tres picos en los caudales observados. La simulación no logró reproducir la primera onda, mientras que la segunda fue representada, aunque con un desfase respecto al registro. En cambio, la tercera onda se ajustó de manera satisfactoria al comportamiento observado.

En esta tercera onda se identifica un bucle principal en sentido horario, acompañado de una trayectoria próxima a una curva única en torno al caudal pico. Al inicio del evento se evidencia una limitación en el suministro de sedimentos; sin embargo, al superarse un umbral de caudal líquido de aproximadamente  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ , se activa una fuente de sedimentos cuasi-ilimitada lo que genera un patrón similar al de una curva única en la relación caudal líquido–caudal sólido.

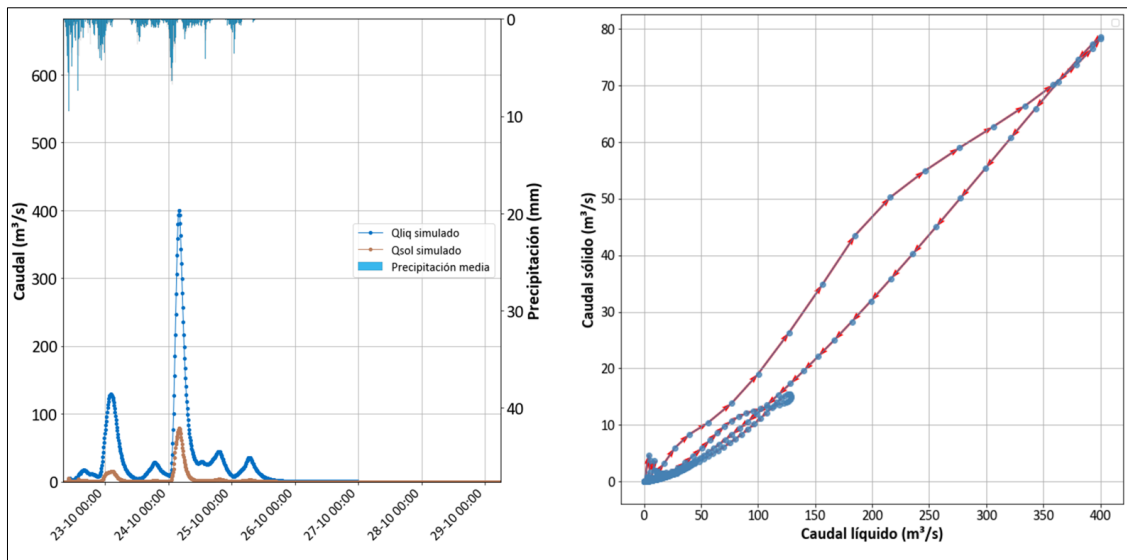


Figura 75. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento octubre 2000.

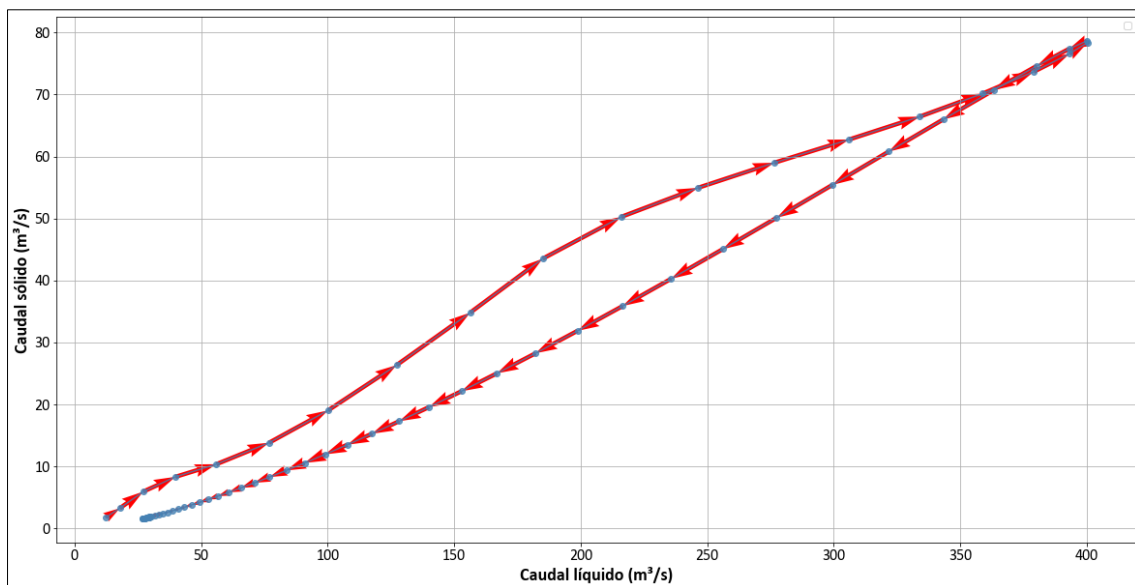


Figura 76. Histéresis de la tercera onda del evento octubre 2000.

El evento de octubre de 2008 presenta un bucle en forma de ocho con apertura muy angosta. Este comportamiento supone cambios en la disponibilidad de sedimentos durante la avenida. En el tramo ascendente de la tercera onda se presenta un agotamiento temprano del suministro de sedimentos, seguido por un reaprovisionamiento posterior a lo largo del evento, lo que indica un arrastre retardado de sedimentos o un reabastecimiento del suministro de sedimentos dentro del propio episodio de escorrentía (Nistor & Church, 2005).

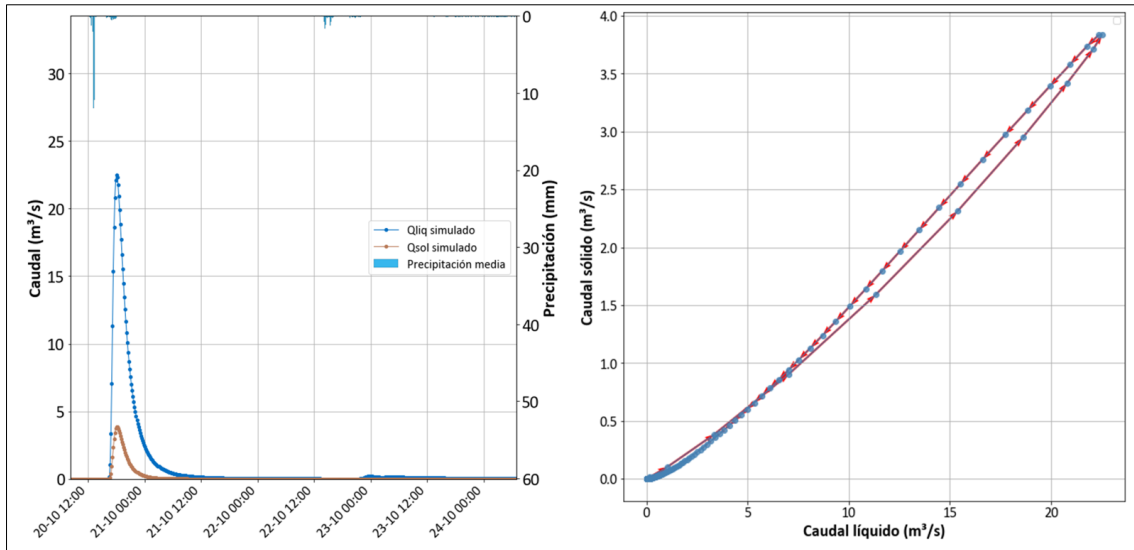


Figura 77. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento octubre 2008.

El evento de marzo de 2022 presenta dos bucles asociados a dos ondas simuladas. El primer bucle es de curva única y está asociado a una disponibilidad “ilimitada” de sedimentos, al menos, para el rango de caudales líquidos simulados en la primera onda. En el segundo bucle presenta un desarrollo antihorario y es angosto. La disponibilidad de sedimentos es limitada, con suministro de sedimentos retrasados por alguna razón, o el caudal sólido tiene tiempo de tránsito diferente al caudal líquido.

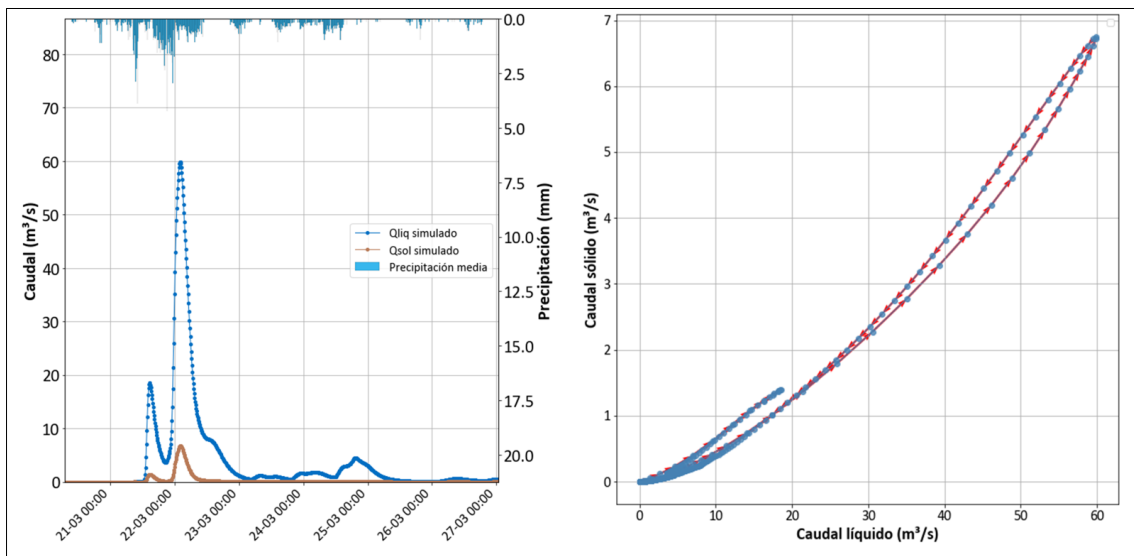


Figura 78. Relación caudal sólido y líquido simulado – evento marzo 2022.

### 5.5. Análisis de la DANA 2024

Como parte del análisis de la DANA 2024 se obtuvieron los caudales líquidos y sólidos simulados en distintos puntos de evaluación hidrológica que tuvieron especial relevancia durante la riada, esto incluye los Barrancos de Torrent, Picassent y Pozalet. Es importante precisar que estos resultados corresponden a un modelo hidrológico que no contempla los desbordamientos del cauce; en consecuencia, los valores presentados representan la cantidad de agua y sedimentos que circulan por los

diferentes barrancos bajo el supuesto de que el flujo permanece completamente encauzado en todo momento. En la Tabla 30 se presenta la ubicación de los puntos propuestos además de la descripción de cada uno de ellos. Además, en la Figura 79 se presenta su distribución espacial.

Tabla 30. Puntos de evaluación hidrológica

<b>Código</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Norte(m)</b>	<b>Altitud (m s.n.m.)</b>	<b>Descripción</b>
PC02	710810	4371956	98	Cruce autopista A-7 y Rambla del Poyo
PC03	711346	4373340	104	Cruce autopista A-7 y Barranco de Pozalet
PC04	710686	4371243	104	Cruce autopista A-7 y Barranco del Gallego
PC05	712748	4367452	75	Cruce autopista A-7 y Barranco de La Horteta
PC06	719451	4360548	41	Cruce autopista A-7 y Barranco de Picassent
PC07	713955	4366434	83	Cruce autopista A-7 y Barranco de Les Canyes
PC08	718173	4361845	38	Cruce autopista A-7 y Barranco del Garroferar
PC09	695947	4371048	304	Barranco del Gayo, aguas arriba de Chiva
PC10	698948	4374858	211	Barranco del Hondo, aguas arriba de Cheste
PC11	720454	4368442	48	Barranco de Torrent, aguas debajo de CV-33
PC12	722064	4367857	25	Barranco de Torrent, aguas arriba de Paiporta
PC13	717561	4368645	33	Confluencia del Barranco Dels Cavalls y Barranco de La Horteta
PC14	716048	4372744	75	Barranco de Pozalet, aguas arriba de Aldaia y Alguas
PC15	724030	4362436	32	Cruce autopista V-31 y Barranco de Picassent
PC16	725082	4364744	17	Cruce autopista V-31 y Barranco de Torrent
PC17	698250	4373343	216	Barranco Grande aguas arriba de la confluencia con Rambla de Chiva
PC18	698154	4373251	219	Barranco de la Cueva Morica aguas arriba de la confluencia con Rambla de Chiva
PC19	698253	4372947	225	Rambla de Chiva aguas arriba de la confluencia con Barranco de la Cueva Morica
PC20	703247	4372747	159	Barranco de la Canaleja o de Sechara antes del Circuito de Cheste
PC21	705840	4368452	160	Barranco del Gallego cercano a la urbanización El Bosque

Fuente: Elaboración propia

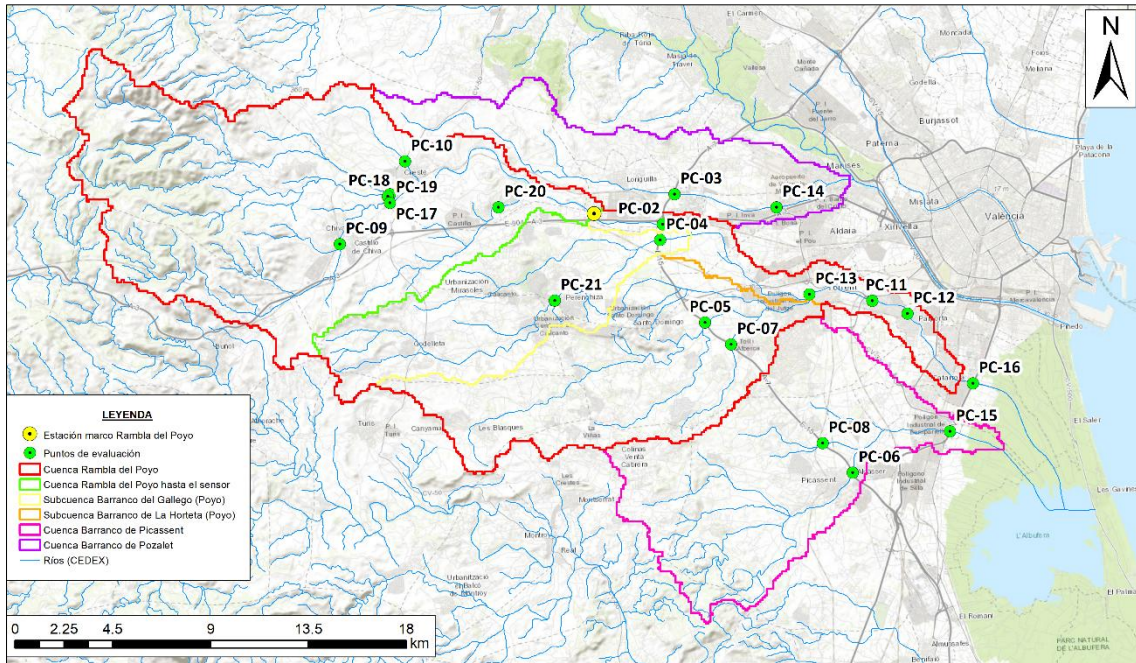


Figura 79. Ubicación de los puntos de evaluación hidrológica.

### 5.5.1. Resultados en puntos de control

En la Figura 80 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P02” ubicado en la intercepción entre la Rambla del Poyo y la autopista A-7. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 3044 m<sup>3</sup>/s a las 19:50 horas del 29 de octubre de 2024.

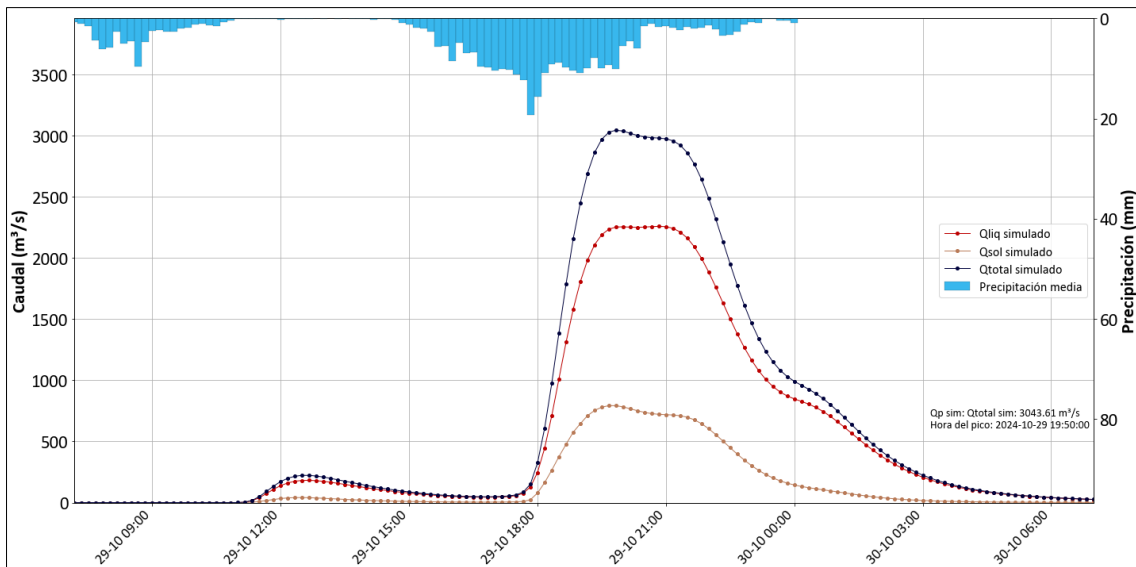


Figura 80. Caudales simulados en el punto de evaluación “P02”.

En la Figura 81 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P03” ubicado en el cruce de la autopista A-7 y el Barranco de Pozolet. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 507 m<sup>3</sup>/s a las 19:10 horas del 29 de octubre de 2024.

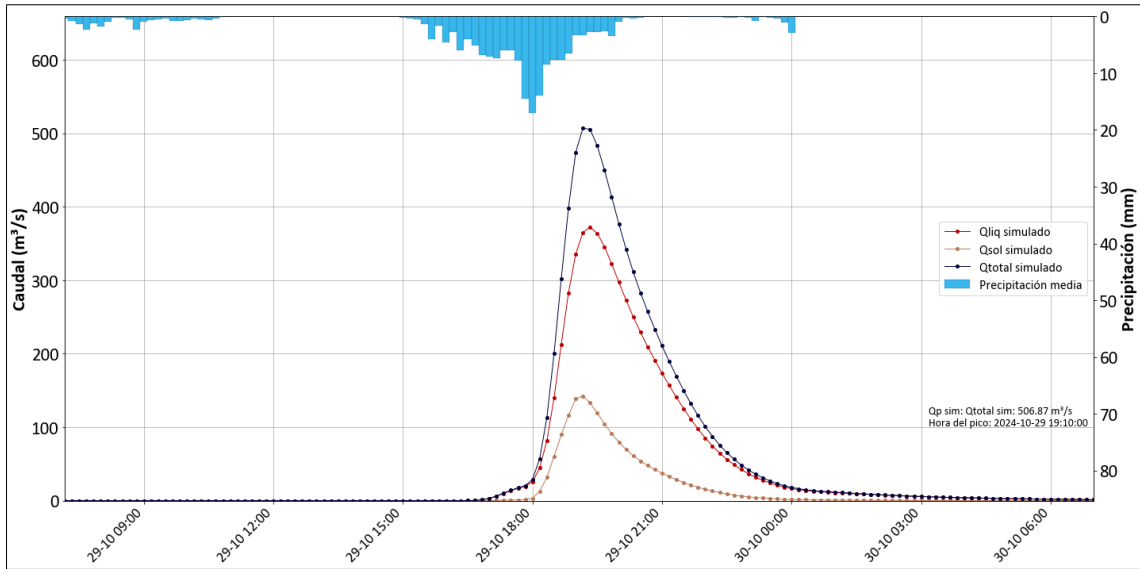


Figura 81. Caudales simulados en el punto de evaluación “P03”.

En la Figura 82 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P04” ubicado en la intercepción entre el Barranco del Gallego y la autopista A-7. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1760 m<sup>3</sup>/s a las 18:40 horas del 29 de octubre de 2024.

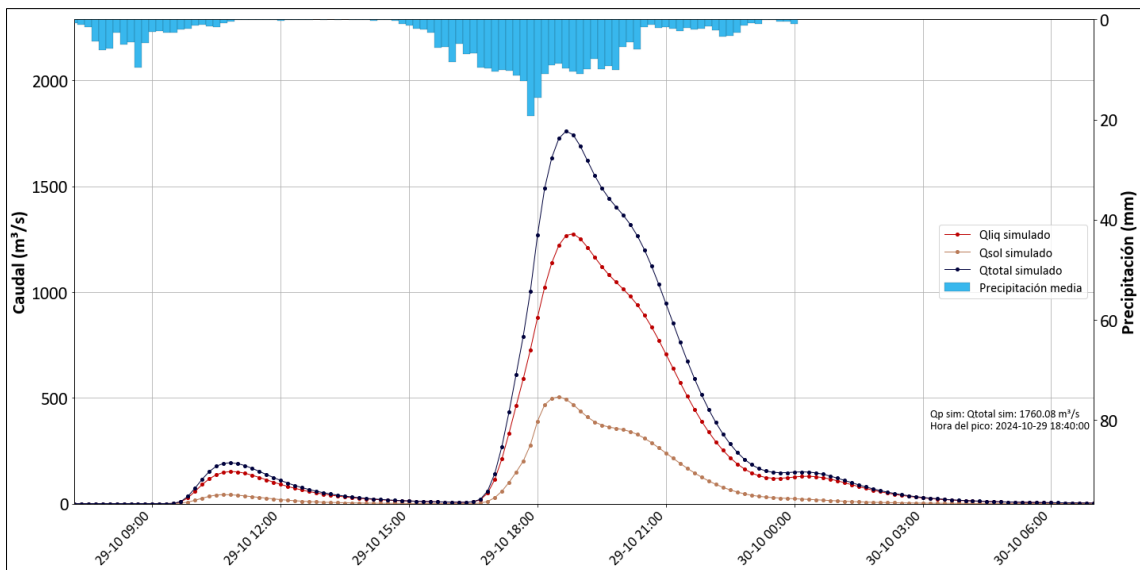


Figura 82. Caudales simulados en el punto de evaluación “P04”.

En la Figura 83 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P05” ubicado en la intercepción entre el Barranco de La Horteta y la autopista A-7. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1778 m<sup>3</sup>/s a las 18:40 horas del 29 de octubre de 2024.

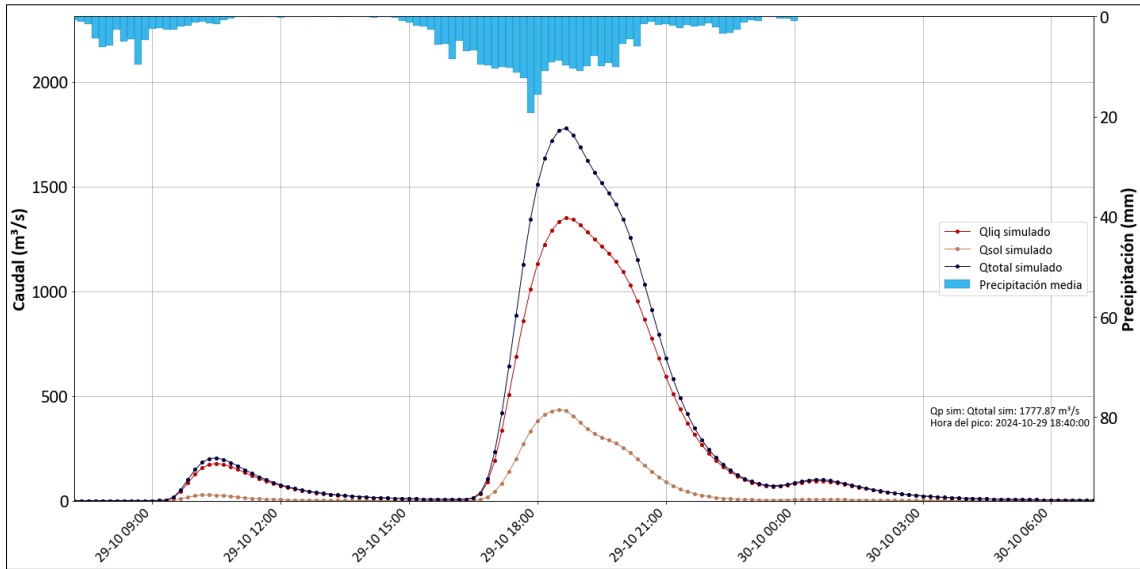


Figura 83. Caudales simulados en el punto de evaluación "P05".

En la Figura 84 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P06" ubicado en el cruce de la autopista A-7 y Barranco de Picassent. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1112 m<sup>3</sup>/s a las 18:30 horas del 29 de octubre de 2024.

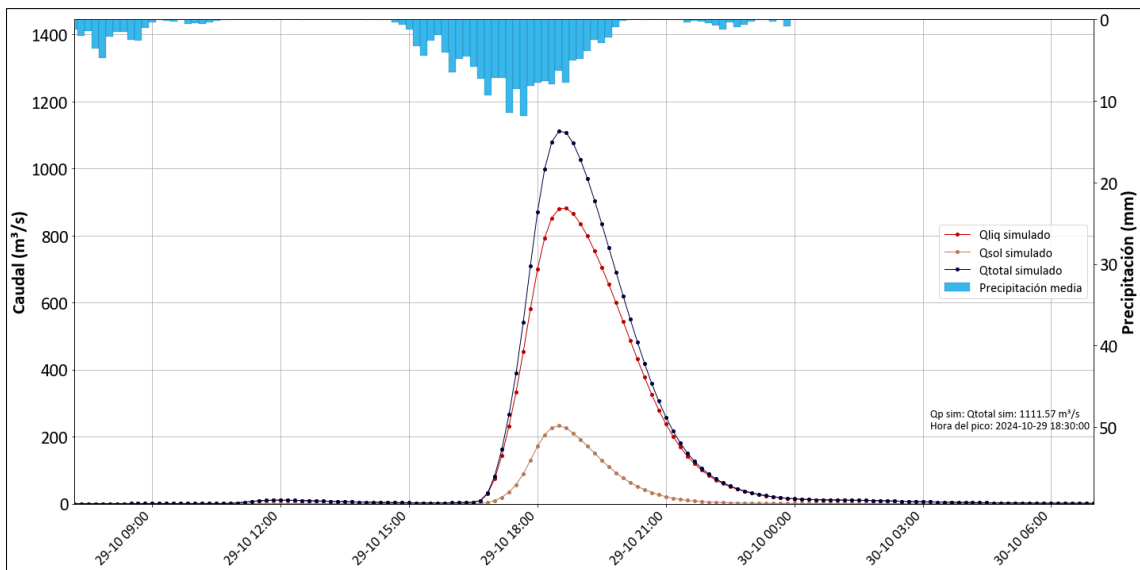


Figura 84. Caudales simulados en el punto de evaluación "P06".

En la Figura 85 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P07" ubicado en la intercepción entre el Barranco de Les Canyes y la autopista A-7. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 41 m<sup>3</sup>/s a las 19:00 horas del 29 de octubre de 2024.

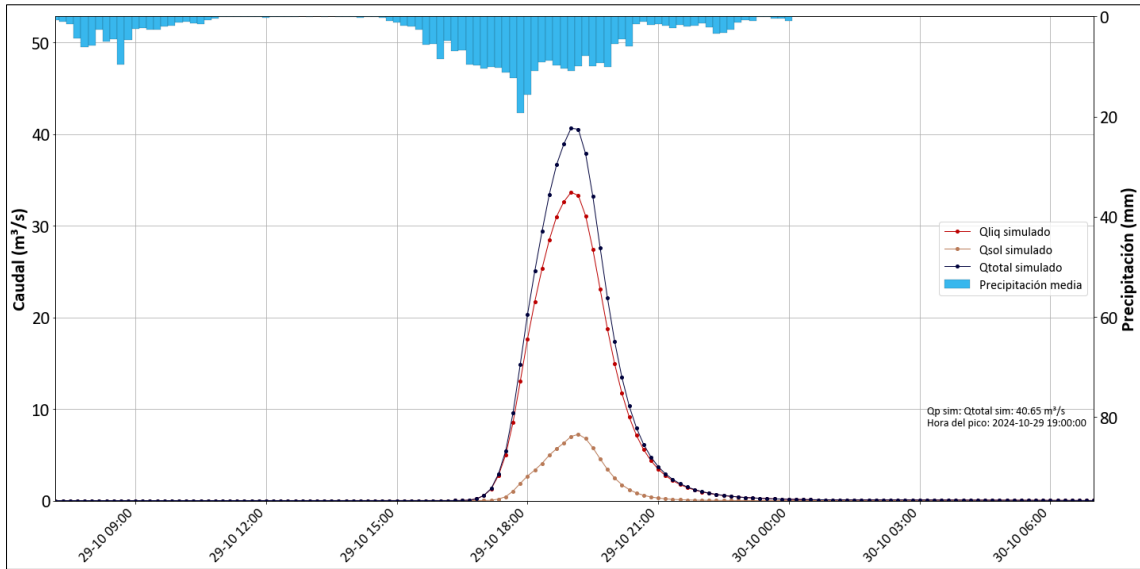


Figura 85. Caudales simulados en el punto de evaluación "P07".

En la Figura 86 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P08" ubicado en el cruce de la autopista A-7 y Barranco del Garroferar. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 33 m<sup>3</sup>/s a las 19:00 horas del 29 de octubre de 2024.

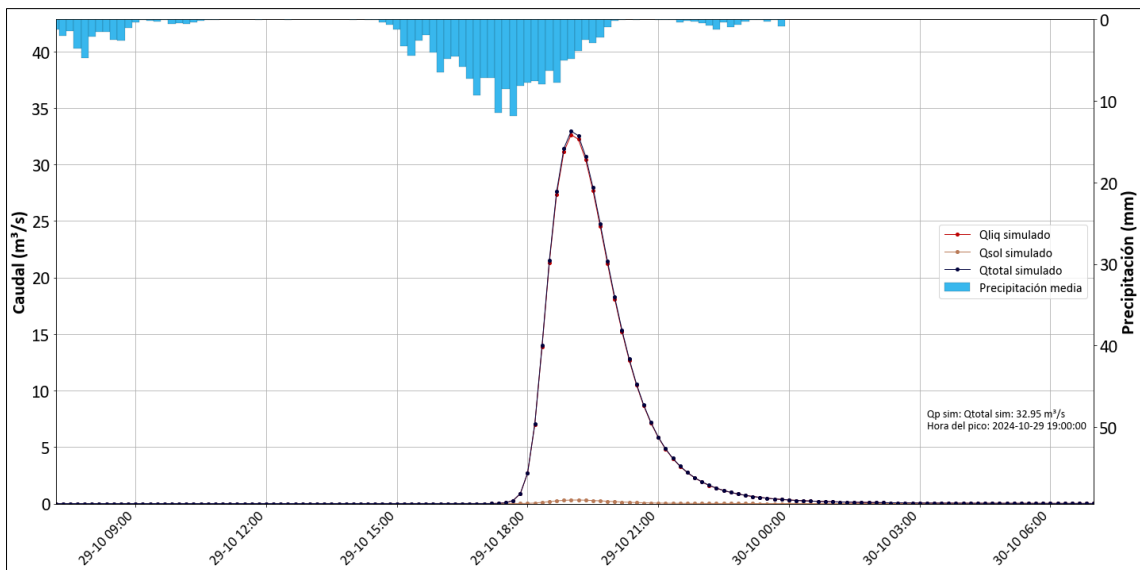


Figura 86. Caudales simulados en el punto de evaluación "P08".

En la Figura 87 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P09" ubicado en el Barranco del Gayo, aguas arriba de la población de Chiva. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1144 m<sup>3</sup>/s a las 20:20 horas del 29 de octubre de 2024.

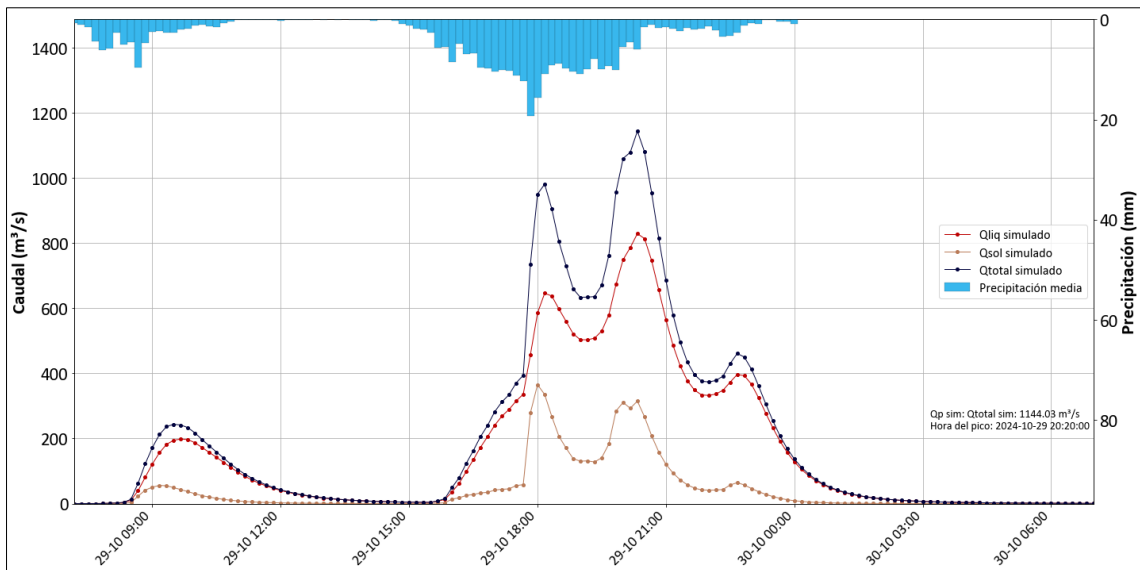


Figura 87. Caudales simulados en el punto de evaluación “P09”.

En la Figura 88 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P10” ubicado en el Barranco del Hondo, aguas arriba de la población de Cheste. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 304 m<sup>3</sup>/s a las 18:10 horas del 29 de octubre de 2024.

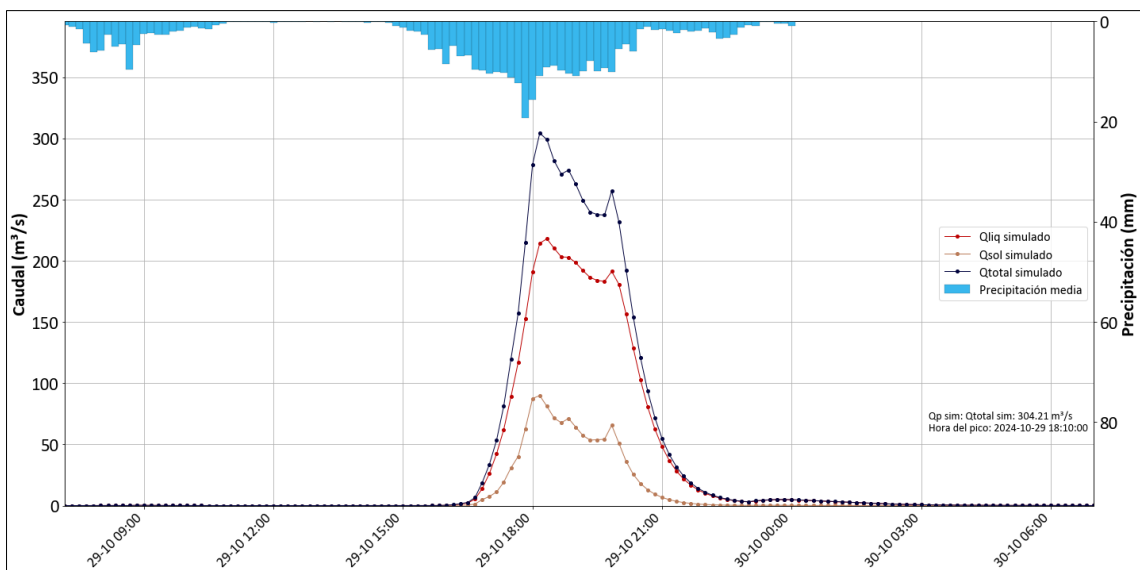


Figura 88. Caudales simulados en el punto de evaluación “P10”.

En la Figura 89 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P11” ubicado en el Barranco del Torrent, aguas abajo de la autovía CV-33. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 5813 m<sup>3</sup>/s a las 20:20 horas del 29 de octubre de 2024.

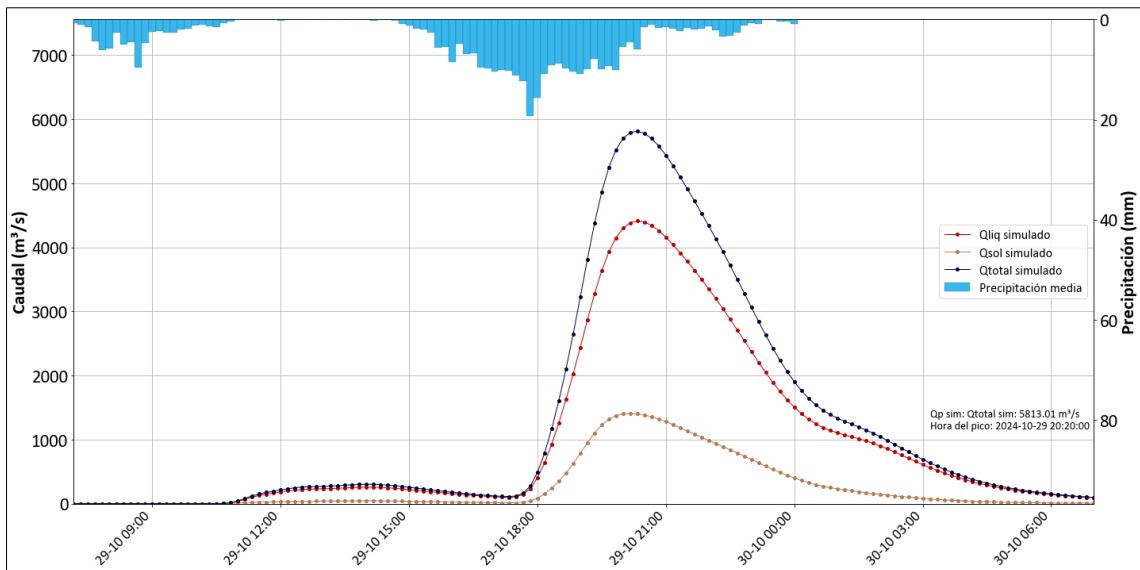


Figura 89. Caudales simulados en el punto de evaluación “P11”.

En la Figura 90 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P12” ubicado en el Barranco del Torrent, aguas arriba de la población de Paiporta. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de  $5790 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 20:30 horas del 29 de octubre de 2024.

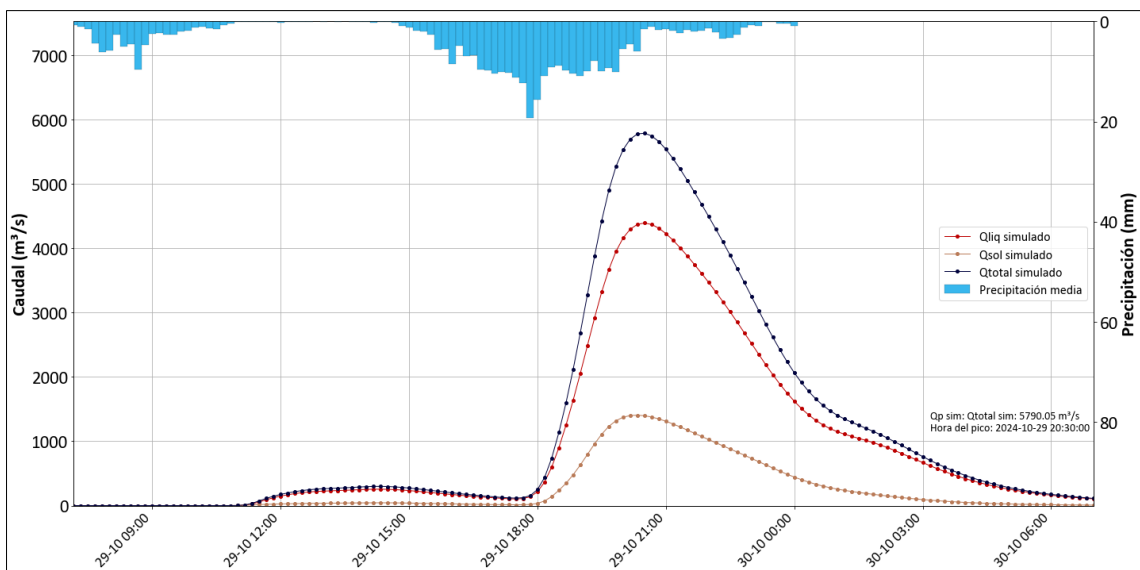


Figura 90. Caudales simulados en el punto de evaluación “P12”.

En la Figura 91 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P13” ubicado aguas debajo de la confluencia del Barranco Dels Cavalls y Barranco de La Horteta. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de  $5840 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 20:10 horas del 29 de octubre de 2024.

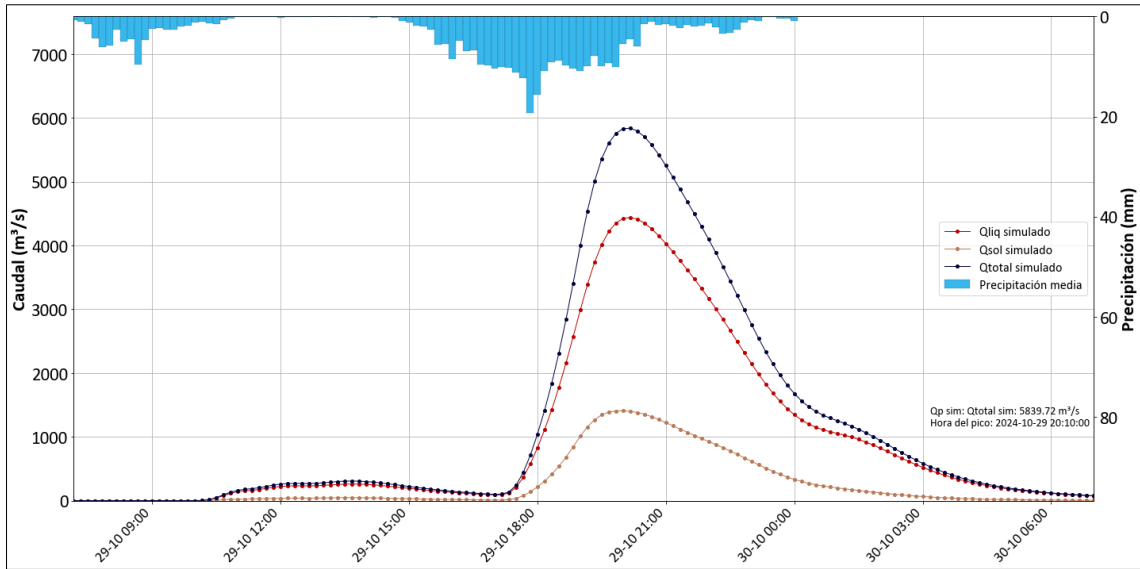


Figura 91. Caudales simulados en el punto de evaluación “P13”.

En la Figura 92 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P14” ubicado en el Barranco de Pozalet, aguas arriba de las poblaciones de Aldaia y Alaquàs. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 457 m<sup>3</sup>/s a las 20:00 horas del 29 de octubre de 2024.

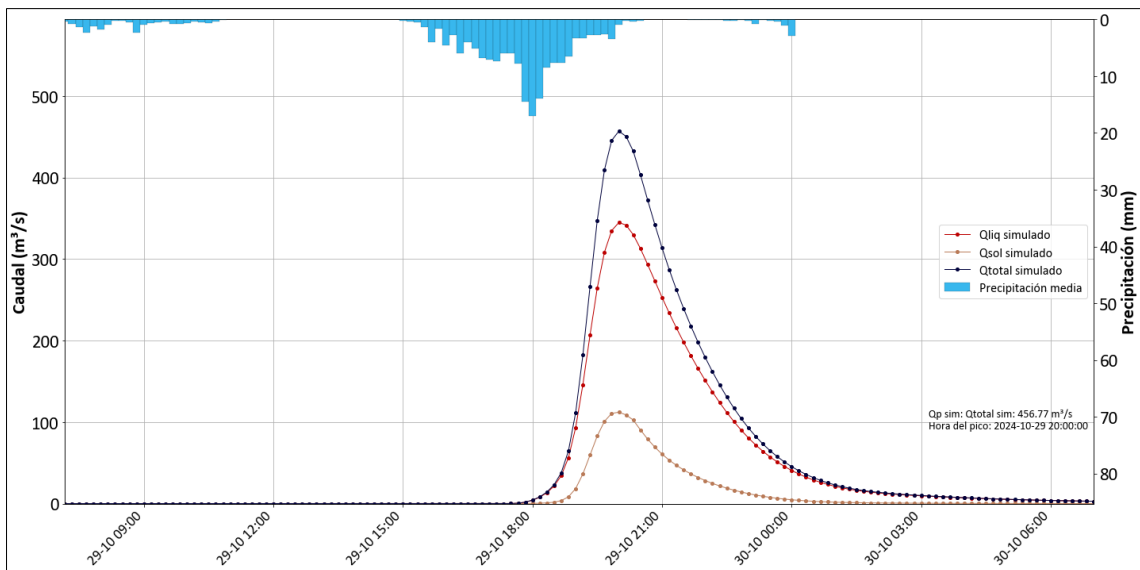


Figura 92. Caudales simulados en el punto de evaluación “P14”.

En la Figura 93 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P15” ubicado en el cruce de la autopista V-31 y Barranco de Picassent. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1074 m<sup>3</sup>/s a las 19:10 horas del 29 de octubre de 2024.

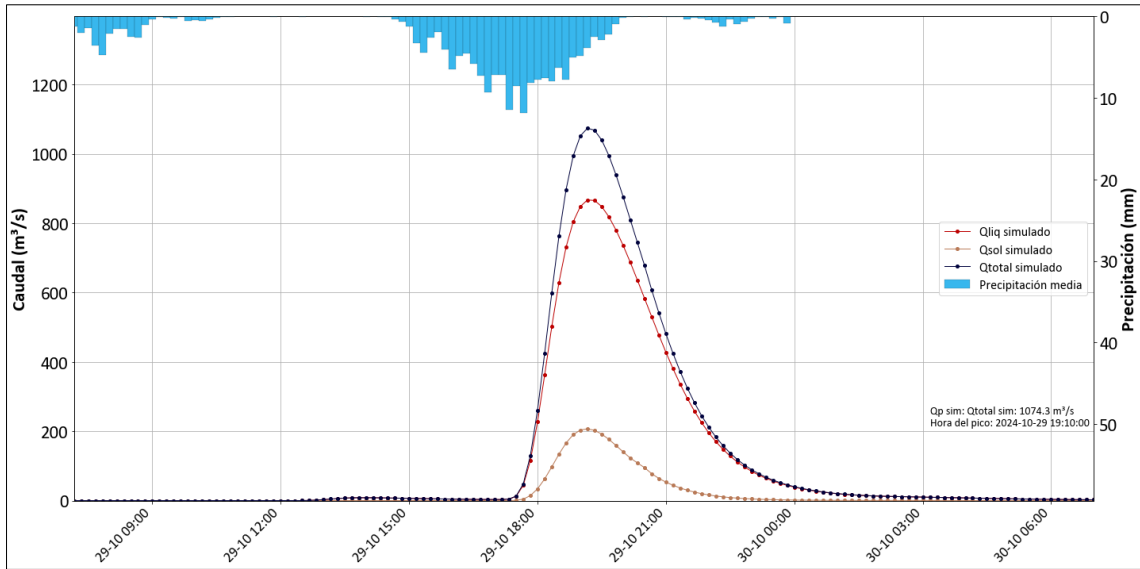


Figura 93. Caudales simulados en el punto de evaluación "P15".

En la Figura 94 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P16" ubicado en el cruce de la autopista V-31 y el Barranco de Torrent. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 5744 m<sup>3</sup>/s a las 20:40 horas del 29 de octubre de 2024.

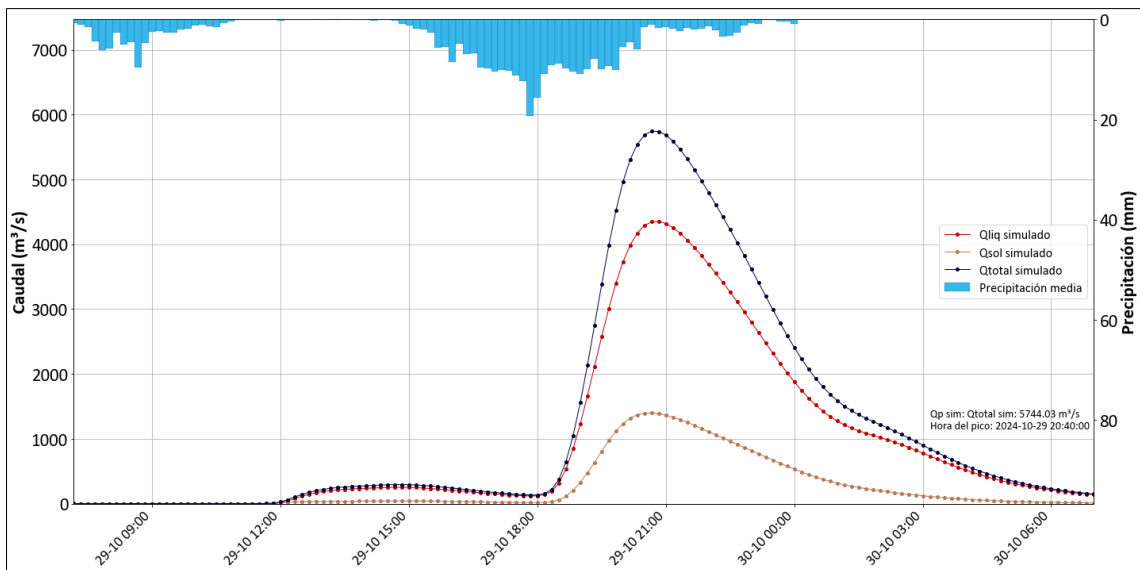


Figura 94. Caudales simulados en el punto de evaluación "P16".

En la Figura 95 se presentan los resultados en el punto de evaluación "P17" ubicado en el Barranco Grande, aguas arriba de la confluencia con la Rambla de Chiva. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1252 m<sup>3</sup>/s a las 20:30 horas del 29 de octubre de 2024.

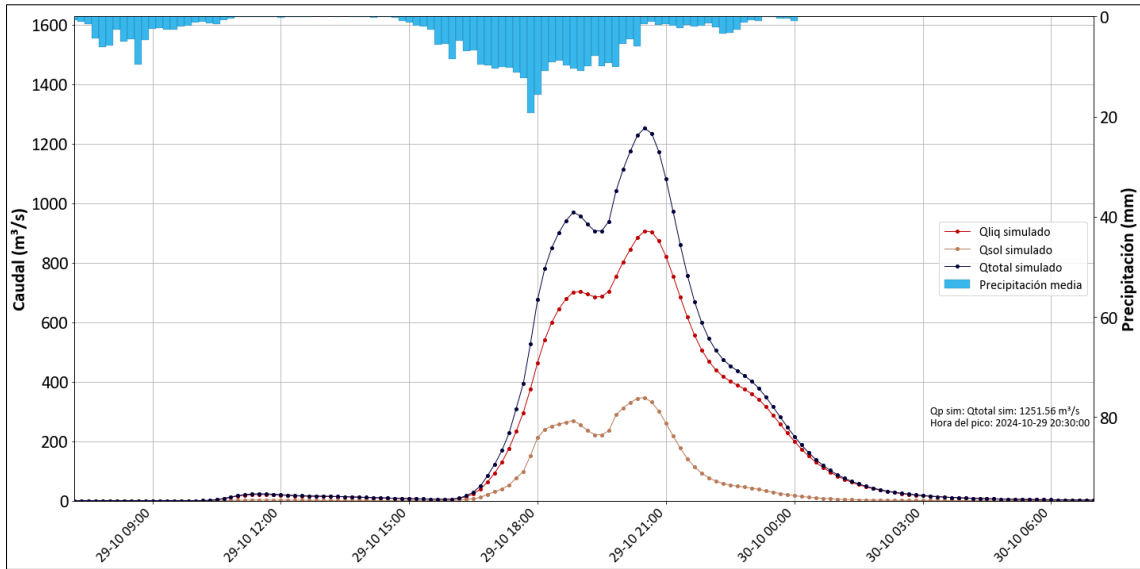


Figura 95. Caudales simulados en el punto de evaluación “P17”.

En la Figura 96 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P18” ubicado en el Barranco de La Cueva Morica, aguas arriba de la confluencia con la Rambla de Chiva. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1252 m<sup>3</sup>/s a las 20:30 horas del 29 de octubre de 2024.

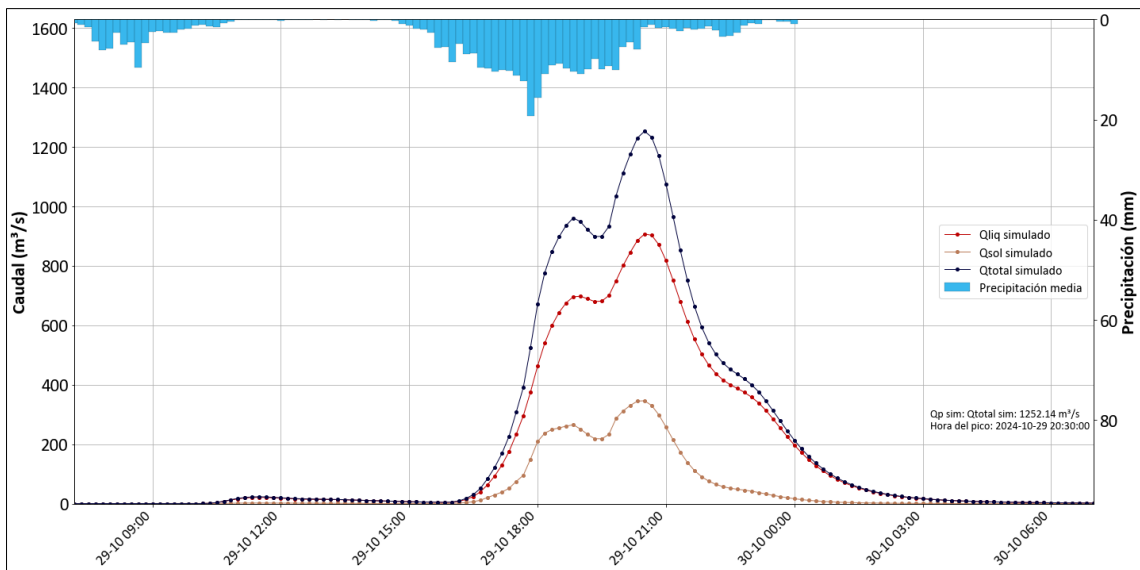


Figura 96. Caudales simulados en el punto de evaluación “P18”.

En la Figura 97 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P19” ubicado en la Rambla de Chiva aguas arriba de la confluencia con Barranco de la Cueva Morica. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1245 m<sup>3</sup>/s a las 20:30 horas del 29 de octubre de 2024.

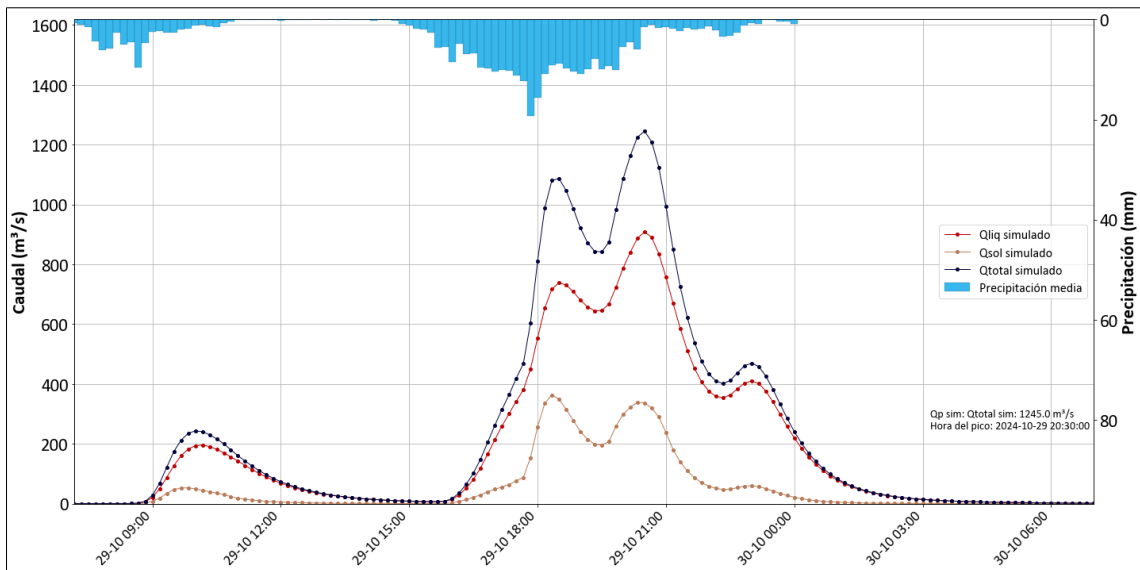


Figura 97. Caudales simulados en el punto de evaluación “P19”.

En la Figura 98 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P20” ubicado en el Barranco de la Canaleja o de Sechara, aguas arriba del Circuito de Cheste. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 657 m<sup>3</sup>/s a las 18:20 horas del 29 de octubre de 2024.

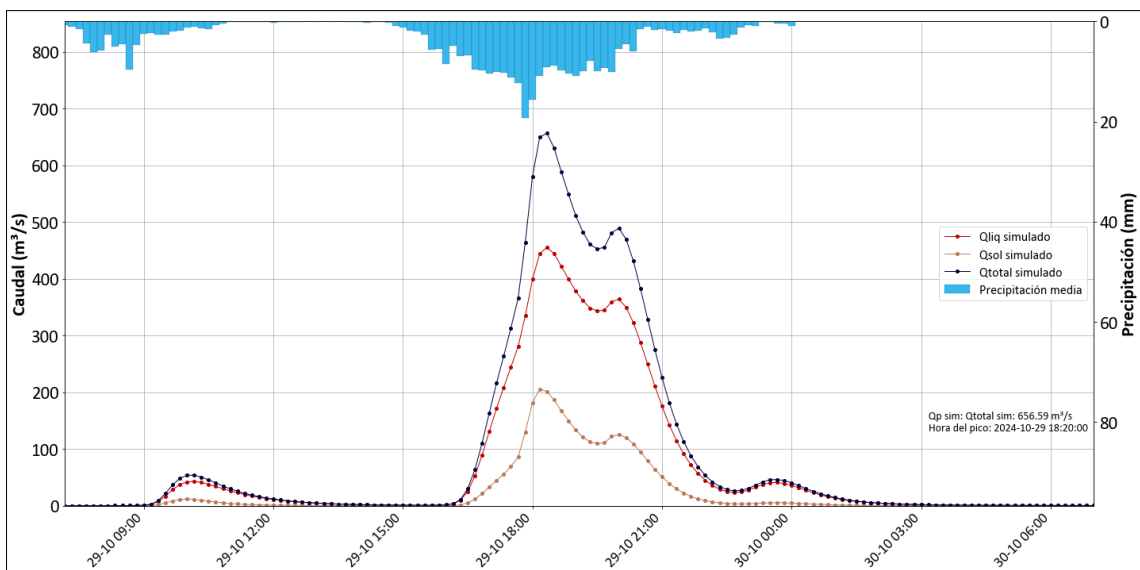


Figura 98. Caudales simulados en el punto de evaluación “P20”.

En la Figura 99 se presentan los resultados en el punto de evaluación “P21” ubicado en el Barranco del Gallego cercano a la urbanización El Bosque. En este punto se ha alcanzado un caudal total máximo (sólido y líquido) de 1084 m<sup>3</sup>/s a las 18:20 horas del 29 de octubre de 2024.

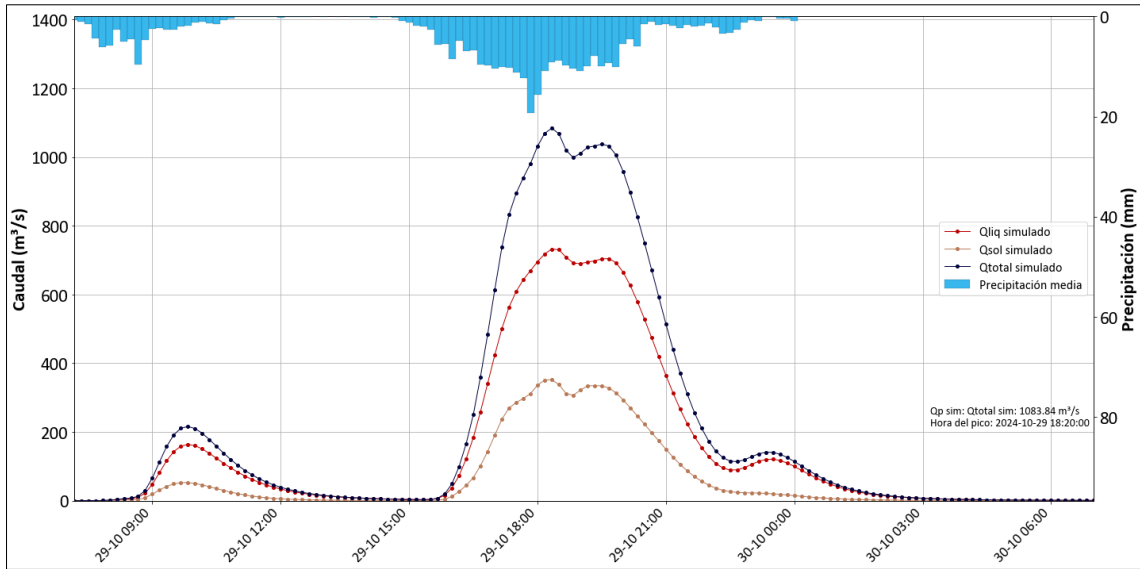


Figura 99. Caudales simulados en el punto de evaluación "P21".

En síntesis, se presentaron los siguientes caudales y tiempo al pico para los puntos de evaluación hidrológica:

Tabla 31. Caudal pico y tiempo al pico simulado

Código	Caudal pico (m³/s)	Fecha
PC-02	3043.61	29/10/2024 19:50
PC-03	506.87	29/10/2024 19:10
PC-04	1760.08	29/10/2024 18:40
PC-05	1777.87	29/10/2024 18:40
PC-06	1111.57	29/10/2024 18:30
PC-07	40.65	29/10/2024 19:00
PC-08	32.95	29/10/2024 19:00
PC-09	1144.03	29/10/2024 20:20
PC-10	304.21	29/10/2024 18:10
PC-11	5813.01	29/10/2024 20:20
PC-12	5790.05	29/10/2024 20:30
PC-13	5839.72	29/10/2024 20:10
PC-14	456.77	29/10/2024 20:00
PC-15	1074.30	29/10/2024 19:10
PC-16	5744.03	29/10/2024 20:40
PC-17	1251.56	29/10/2024 20:30
PC-18	1252.14	29/10/2024 20:30
PC-19	1245.00	29/10/2024 20:30
PC-20	656.59	29/10/2024 18:20
PC-21	1083.84	29/10/2024 18:20

Fuente: Elaboración propia

### 5.5.2. Validación espacial con información no sistemática

Del evento de la DANA de 2024 se dispone de información no sistemática, principalmente testimonios ciudadanos que reportan las horas aproximadas en que se produjeron los desbordes en distintos puntos del ámbito de estudio. Estos registros constituyen un soporte adicional para realizar una validación espacial del modelo hidrológico subdiario implementado. Al contrastar dichos testimonios con la capacidad máxima de los cauces, es posible evaluar la representatividad del modelo en diferentes zonas de la cuenca.

En este sentido, el teléfono de Emergencias 112 recogió información en tiempo real sobre el comportamiento de los barrancos, en base a las llamadas de la población. Se dispone de los siguientes registros:

- **Población de Paiporta:** se recibieron llamadas por desborde del barranco a las 18:32 h (Ballester et al., 2025). El caudal máximo estimado para este tramo es de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  (Dirección Técnica, s. f.). Dicho punto se asocia al punto de control hidrológico "P12", ubicado aguas arriba de Paiporta, en el Barranco de Torrent. Según el modelo, el umbral de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  fue alcanzado alrededor de las 18:20 h.
- **Población de Catarroja:** se recibieron llamadas reportando desborde a las 18:56 h (Ballester et al., 2025). La capacidad máxima del cauce en este sector es de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  (Dirección Técnica, s. f.). El punto de control hidrológico correspondiente es el "P16", en el que, según el modelo, se alcanzó dicho umbral aproximadamente a las 18:40 h. Cabe precisar que el modelo hidrológico no considera los efectos de laminación producidos durante los desbordes (inundaciones) circunstancia que tiende a retrasar la propagación de la onda de crecida. No obstante, los resultados simulados muestran una buena coherencia con los testimonios.
- Por otro lado, los barrancos del Gallego y La Horteta constituyen afluentes de la Rambla del Poyo. El Gallego se ubica aguas arriba dentro de la red, mientras que La Horteta se encuentra más próximo a las poblaciones de Torrent, Picanya y Paiporta. Según los hidrogramas en los puntos de control P02, P04 y P05 (ubicados en la autovía A-7 sobre la Rambla del Poyo, el Barranco del Gallego y el Barranco de La Horteta, respectivamente), a las 18:00 h tanto La Horteta como el Gallego se encontraban próximos a su caudal pico, con valores cercanos a  $1700 \text{ m}^3/\text{s}$  según la simulación, mientras que la Rambla del Poyo apenas iniciaba la segunda onda de crecida. Esto sugiere que los desbordes iniciales registrados en Paiporta obedecen principalmente a las aportaciones de estos afluentes, antes que al propio caudal de la Rambla del Poyo.

- **Población de Loriguilla:** a las 18:13 h, una llamada al servicio de Emergencias 112 alertó sobre el riesgo inminente de desborde en el Barranco de Pozalet (Marco, 2025). La capacidad máxima de este cauce se estima en aproximadamente 240 m<sup>3</sup>/s. El punto de control hidrológico correspondiente es el “P03”, ubicado en el cruce de la autovía A-7 con el Barranco de Pozalet. De acuerdo con los resultados del modelo hidrológico subdiario, la capacidad máxima del cauce se habría alcanzado alrededor de las 18:30 h, lo que resulta comparable con el testimonio reportado (Dirección Técnica, s. f.).
- En relación con el transporte de sedimentos, como se expuso en la Sección 4.3, se estimó que el volumen total movilizado durante el evento de la DANA 2024 fue de 29.3 hm<sup>3</sup> según el modelo diario. Por otro lado, en el modelo subdiario se puede considerar a los puntos de control hidrológico “P15” y “P16”, ubicados en el cruce de la autopista V-31 con los barrancos de Picassent y Torrent, como los principales barrancos que explican el total de sedimentos transportados durante el evento de la DANA 2024. En particular, en el punto “P15” se estimó un volumen de sedimento de 1.71 hm<sup>3</sup>, mientras que en el punto “P16” se estimó un volumen total de 22.81 hm<sup>3</sup>, lo que representa en conjunto 24.52 hm<sup>3</sup>, valor comparable a la estimación realizada en el modelo diario.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se implementaron dos modelos hidro-sedimentológicos en TETIS, a escala diaria y subdiaria (10 minutos), mediante procesos de calibración y validación en la estación de aforo de la Rambla del Poyo. Esto permitió generar una serie continua de caudales y analizar en detalle los hidrogramas simulados durante la DANA 2024, así como en otros eventos significativos, en diferentes puntos de evaluación hidrológica. A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- El modelo hidrológico a escala diaria fue calibrado de manera satisfactoria. El análisis de precipitaciones permitió seleccionar el conjunto más adecuado de estaciones pluviométricas (Rambla del Poyo, Picassent y Turís), que junto con los factores correctores representaron de forma adecuada el comportamiento efímero de la rambla. El estado inicial se estimó mediante dos recirculaciones. La calibración del periodo 1996–2010 alcanzó un índice NSE satisfactorio de 0.52, mientras que la validación para 2011–2024 obtuvo un valor muy bueno de 0.92.
- El modelo de sedimentos a escala diaria fue calibrado satisfactoriamente a partir de información secundaria de la DANA 2024. Ante la falta de información, se asumió una relación lineal entre el volumen del evento y el volumen de sedimentos generados, lo que permitió realizar la calibración utilizando un volumen estimado en la Rambla del Poyo de  $13 \text{ hm}^3$  ( $151 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Este valor posibilitó el ajuste de los parámetros de transporte en ladera y en cauce. Asimismo, la información sobre los sedimentos acumulados en los azudes permitió calibrar los parámetros asociados al transporte en cárcavas y ladera. El estado inicial se estimó mediante dos recirculaciones. Finalmente, para los dos eventos de mayor magnitud (octubre de 2000 y DANA 2024), se estimaron porcentajes de sedimentos del 10 % y 30 %, respectivamente.
- A partir de la información sistemática de las estaciones de AEMET se simularon los caudales totales para el periodo 1920–2024. El análisis de frecuencia se desarrolló bajo dos enfoques: considerando la serie de máximos anuales con y sin la inclusión del evento extremo asociado a la DANA 2024. En ambos casos se empleó la distribución Lognormal de dos parámetros, seleccionada por presentar el menor valor del AIC y por mostrar una adecuada coherencia gráfica entre la *plotting position* y la curva ajustada. Los resultados evidenciaron que la DANA 2024 ejerce una influencia significativa sobre los parámetros de la distribución. Esta alteración se traduce en variaciones notables de los cuantiles estimados y, por consiguiente, en los períodos de retorno asociados. En particular, la inclusión de la DANA 2024, al tratarse de un valor extremo, modificó sustancialmente la representación estadística del régimen de caudales debido al aumento de la desviación estándar, parámetro de forma de la función seleccionada. Como consecuencia, el período de retorno del caudal analizado se incrementó de 1878 años a 4001 años en los escenarios sin y con la DANA 2024, respectivamente.

- A escala subdiaria se implementó un enfoque adecuado para el cálculo del estado inicial, aplicando el mismo factor corrector del tanque de almacenamiento estático tanto en el modelo diario como en el subdiario. Se emplearon 19 estaciones procedentes de AEMET, AVAMET y SAIH-CHJ. La calibración alcanzó un índice de NSE de 0.89, y el hidrograma de caudales totales se ajustó de forma adecuada a la primera onda, así como en la rama ascendente de la segunda. El caudal pico asociado al evento de la DANA 2024 en la estación Rambla del Poyo fue de 3106.3 m<sup>3</sup>/s a las 19:30 del 29 de octubre de 2024. El porcentaje máximo de sedimentos en un paso de tiempo alcanzó un valor de 26%, mientras que, para todo el evento, la contribución de sedimentos respecto al volumen total fue de 23%, en un orden de magnitud similar al obtenido en el modelo diario.
- La validación temporal del modelo subdiario no fue satisfactoria debido al drástico cambio en las estaciones pluviométricas empleadas. En la validación solo se utilizaron cinco estaciones procedentes del SAIH-CHJ, lo que limitó la adecuada representación de la distribución de lluvias del evento. No obstante, se obtuvieron resultados aceptables para los eventos de octubre de 2000, octubre de 2008 y marzo de 2022, considerando las restricciones existentes, los cuales fueron analizados en la sección de histéresis.
- El análisis de histéresis evidenció comportamientos diferenciados entre los eventos estudiados. En particular, la DANA 2024 presentó dos bucles asociados a las dos ondas de crecida, ambos con un desarrollo en sentido horario.
- El análisis en los puntos de control hidrológicos permitió obtener los hidrogramas asociados al evento de la DANA 2024. Si bien no se dispone de información sistemática para una validación espacial rigurosa, se empleó información no sistemática como alternativa proxy. En este sentido, los registros telefónicos del servicio de Emergencias 112, que documentan la hora y los lugares de desbordamiento de los barrancos, resultaron útiles para contrastar los resultados del modelo. El modelo reprodujo de manera coherente el momento en que los cauces alcanzaron su capacidad máxima en los barrancos de Torrent y Pozalet, en las poblaciones de Paiporta, Catarroja y Loriguilla. Asimismo, se observó que la onda de crecida que finalmente afectó a la población de Paiporta se debió principalmente a los aportes de los barrancos Gallego y La Horteta, cuyos caudales simulados alcanzaron valores elevados hacia las 18:00 h. En contraste, en la Rambla del Poyo, próxima a la estación de aforo, el incremento de la segunda onda de crecida apenas comenzaba en ese mismo intervalo temporal. Finalmente, el modelo de sedimentos a escala subdiaria puede considerarse válido, ya que presenta coherencia con el volumen total de sedimentos estimado en el modelo diario (29.3 hm<sup>3</sup>), resultando comparable con la estimación obtenida en el modelo subdiario (24.52 hm<sup>3</sup>).

## 7. Bibliografía

- Ballester, L., Gallardo, C., & García Nieves, J. L. (2025, marzo 5). *El Cecopi se constituyó a las 17 horas con el mayor pico de llamadas al 112 en una hora: 2.438*. Levante - EMV. <https://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2025/03/05/cecopi-constituyo-17-horas-mayor-114942107.html>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Bussi, G. (2014). *Implementation of a distributed sediment model in different data availability scenarios*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J. J., & Julien, P. Y. (2014). Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling and Software*, 58, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.010>
- Camarasa Belmonte, A. M. (1990). Génesis de avenidas en pequeñas cuencas semiáridas: la Rambla de Poyo (València). *Cuadernos de Geografía*, 48, 81-104.
- Camarasa Belmonte, A. M. (2006). Inundaciones en España. Tipología. La importancia de las avenidas súbitas. Riesgos Naturales y Desarrollo Sostenible. Impacto, Predicción y Mitigación, I.G.M.E., Serie Medio Ambiente. *Riesgos Geológicos*, 10, 167-178.
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.019>
- Chen, C. N. (1975). Design of Sediment Retention Basins. *Proceedings of the National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control*, 285-298.
- Chen, Q., Mudd, S. M., Attal, M., & Hancock, S. (2024). Extracting an accurate river network: Stream burning re-revisited. *Remote Sensing of Environment*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114333>
- Dick, G. S., Anderson, R. S., & Sampson, D. E. (1997). Controls on flash flood magnitude and hydrograph shape, Upper Blue Hills badlands, Utah. *Geology*, 25(1), 45-48.
- Dietrich, W. E. (1982). Settling velocity of natural particles. En *WATER RESOURCES RESEARCH* (Vol. 18, Número 6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR018i006p01615>
- Dirección Técnica. (s.f.). *Adecuación ambiental y drenaje de la cuenca del Poyo vertiente a la Albufera*.
- Granata, F., Zhu, S., & Di Nunno, F. (2025). Hydrological extremes in the Mediterranean basin: interactions, impacts, and adaptation in the face of climate change. En

- Regional Environmental Change* (Vol. 25, Número 3). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10113-025-02432-7>
- Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida. (2021). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9*. <http://lluvia.dihma.upv.es/>
- López Gómez, D. (2025, mayo 29). *Estudios del CEDEX para el apoyo a la recuperación de la DANA*. <https://www.youtube.com/live/b0FkCmY0nN8>
- Marco, L. (2025, julio 25). *La Guardia Civil detecta 166 llamadas al 112 antes del Es-Alert de la dana desde la zona más alta del letal barranco del Poyo*. *elDiario.es*. [https://www.eldiario.es/comunitat-valenciana/guardia-civil-detecta-166-llamadas-112-alert-dana-zona-alta-letal-barranco-poyo\\_1\\_12492639.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.eldiario.es/comunitat-valenciana/guardia-civil-detecta-166-llamadas-112-alert-dana-zona-alta-letal-barranco-poyo_1_12492639.html?utm_source=chatgpt.com)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). *Episodio de lluvias y avenidas del 28 de octubre al 4 de noviembre de 2024*. <https://saih.chj.es/docs/20241029-1104Informe-Episodio-C-version2.pdf>
- Montalvo Montenegro, C. I. (2017). *Estimación de pérdidas de cauce, modelización de transporte de sedimentos y cambio climático de una cuenca mediterránea (Rambla de la Viuda)* [Trabajo Fin de Máster]. Universitat Politècnica de València.
- Montoya, J. J. (2008). *Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nistor, C. J., & Church, M. (2005). Suspended sediment transport regime in a debris-flow gully on Vancouver Island, British Columbia. *Hydrological Processes*, 19(4), 861-885. <https://doi.org/10.1002/hyp.5549>
- Verstraeten, G., & Poesen, J. (2000). Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: Methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography*, 24(2), 219-251. <https://doi.org/10.1191/030913300676742153>
- Verstraeten, G., & Poesen, J. (2001). Modelling the long-term sediment trap efficiency of small ponds. *Hydrological Processes*, 15(14), 2797-2819. <https://doi.org/10.1002/hyp.269>