

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

Análisis de sensibilidad de un estudio hidrológico.
Replanteamiento de la metodología usada.
Aplicación: Río Anzur.

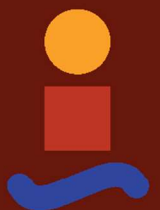
Autor: Pablo Rodríguez Romero

Tutora: Carmen Zarzuelo Romero

**Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de
Fluidos**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

**Análisis de sensibilidad de un estudio hidrológico.
Replanteamiento de la metodología usada.
Aplicación: Río Anzur.**

Autor:

Pablo Rodríguez Romero

Tutora:

Carmen Zarzuelo Romero

Profesora Ayudante Doctora

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Análisis de sensibilidad de un estudio hidrológico. Replanteamiento de la metodología usada. Aplicación: Río Anzur.

Autor: Pablo Rodríguez Romero

Tutora: Carmen Zarzuelo Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mi hermano, por ser un espejo
en el que reflejarme.*

Agradecimientos

A mi familia por formar parte de este proceso. A todos los profesores que han ayudado a que este se hiciera realidad.

“Existe una marea en los asuntos humanos, que, tomada en pleamar, conduce a la fortuna; pero, omitida, todo el viaje de la vida va circuido de sombras y desgracias. En esa pleamar flotamos ahora, y debemos aprovechar la corriente cuando es favorable o perder nuestro cargamento.”

Julio César (William Shakespeare)

El agua es uno de los recursos más demandados por la sociedad moderna dado su protagonismo en torno a la vida cotidiana e industrial. Es por ello, que la gestión de este recurso resulta fundamental y que los instrumentos con los que éste se gestiona deben de ser lo más detallados posibles.

En la actualidad, la estandarización de los proyectos hidrológicos pone en duda si el aprovechamiento del recurso en cuestión está siendo el adecuado o si por el contrario cae en una falta de discretización para cada caso de estudio. Si es verdad que todos los estudios se quedan del lado de la seguridad, pero ese “sobredimensionamiento” de las estructuras puede ser ineficaz. A esta discusión, se le suma el factor climático como elemento fundamental para estudios ya que pueden poner en duda las metodologías usadas hasta ahora.

El objeto de este estudio consistirá por tanto en un análisis de sensibilidad sobre las metodologías empleadas actualmente en los estudios hidrológicos para comprobar su grado de exactitud en un contexto de una subcuenca atlántica (Río Anzur). Posteriormente se analizará el cambio climático sobrevenido para un periodo de retorno de 100 años, datos que se obtienen de estudios realizados por el CEDEX [1] y la AEMET [2]. El escenario del cambio climático aplicará con las metodologías seguidas.

Este estudio de sensibilidad se va a centrar en los tres parámetros más importantes que caracterizan los estudios hidrológicos: Caudal total de avenida como la suma de m^3 del hidrograma, Caudal punta de dicho hidrograma en m^3/s y Tiempo pico, siendo éste el tiempo en horas desde el inicio del episodio hasta el Caudal punta.

Para ello, se han estudiado las diferentes alternativas con las que se trabaja en la actualidad para modelar las infiltraciones del suelo y el hietograma de diseño: Método de las Abstracciones “SCS-CN” y Método de Green-Ampt, Método del hietograma de Bloques Alternos y un método alternativo propuesto basado en el percentil 80 de las precipitaciones locales, respectivamente.

De forma complementaria, se ha procedido a hacer una calibración y validación previa del estudio para la zona de la cuenca seleccionada con el fin de obtener unos resultados lo más fidedignos posibles. A partir de dicha calibración se han determinado una serie de correlaciones para caracterizar en ocasiones futuras el suelo sin la necesidad de acudir a estudios de campo.

Finalmente, se ha concluido con una metodología óptima para el caso formado por el Método de las Abstracciones *SCS-CN* para el caso de las pérdidas de precipitación y un Método Alternativo basado en el percentil 80 del histórico de lluvias sobre la zona para modelar el estudio del hietograma de diseño. Arrojando unos resultados del 8% superiores de media.

Abstract

Water is one of the most demanded resources by modern society given its role in everyday and industrial life. Due to this reason, management of this resource is essential.

Currently, the standardization of hydrological projects gives a talk over the lack of accurate results given by these studies. At the same way, the climatic factor is added as a fundamental element for studies that spans over years.

The object of this study consists of a sensitivity analysis about the methodologies currently used in hydrological studies to verify their degree of accuracy in the context of an Atlantic sub-basin (Anzur River) and with the climatic parameter studied in a complementary manner.

This sensitivity study will focus on the three most important parameters that characterize hydrological studies: Total flood flow, Peak flow, and Peak time. To do this, the different alternatives currently used to model soil infiltrations and the design hyetogram have been studied: Abstractions Method "SCS-CN", Green-Ampt Method, Block Hyetogram Method and a proposed alternative method based on the 80th percentile of local rainfall.

Additionally, a previous calibration and validation of the study has been carried out for the selected basin area to obtain the most reliable results possible. According to this calibration, a series of correlations have been determined to characterize the soil on future occasions without the need to go on field studies.

Lastly, it has been concluded with an optimal methodology for our case formed by the Method of Abstractions or SCS-CN for the case of precipitation losses and an Alternative Method based on the 80th percentile of the historical rainfall over the area to model the hyetogram study.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de ilustraciones	xviii
1 Introducción	1
2 Contexto: Zona de Estudio y tipología de la cuenca.	11
2.3. Tipología de la Cuenca	11
2.1.1 Características geométricas de la cuenca	12
3 Metodología seguida para la zona de estudio.	16
3.1 Calibración previa de los parámetros asociados al Q_t , Q_p y T_p	16
3.1.1 Número de curva (CN). Método de las Abstracciones	16
3.1.2 Calibración de η , Θ_e y K . Método de Green-Ampt	17
3.1.3 Coef 1 y Coef 2. Ajuste del tlag	17
3.2 Estudio de alternativas entre las diferentes metodologías de estudio	18
3.2.1 Estudio de precipitaciones	18
3.2.2 Hietogramas	18
3.2.3 Estudio de infiltraciones	19
3.2.4 Hidrogramas	19
4 Bloque I: Calibración y validación de los parámetros necesarios.	20
4.1 Ajuste de los parámetros para los Métodos de Infiltración	21
4.1.1 Calibración del CN. Método de Infiltración: SCS-CN	22
4.1.2 Calibración de η , Θ_e y K . Método de infiltración: Green-Ampt	24
4.2 Calibración del Tiempo pico (T_p). Parámetros empleados: Coef1 y Coef2.	26
4.2.1 Conclusión. Resumen de hidrogramas para los tres episodios usados en la calibración.	29
5 Bloque II: Metodología seguida en el análisis de sensibilidad	33
5.1 Introducción	33
5.2 Estudio de precipitaciones	34
5.3 Hietogramas	37
5.3.1 Método de los bloques alternos	37
5.3.2 Método de las 7am-7am	38
5.3.3 Método Alternativo del percentil 80	39
5.4 Estudio de infiltraciones	41
5.4.1 Método de las Abstracciones	41
5.4.2 Método de Green-Ampt	44
5.5 Hidrogramas	44
6 Previsión climática a 100 años: Corrección de los resultados en base a las proyecciones.	47
7 Resumen y Conclusiones del estudio	50

Anexo 1: Histograma de diseño	52
Anexo 2: Pérdidas de precipitación	54
Anexo 3: Tabla de valores del Método SCS para hidrogramas.	57
Anexo 4: Resultados de la calibración del método de Green-Ampt.	58
Anexo 5: Resumen de los resultados obtenidos por los modelos estadísticos del estudio.	60
Anexo 6: Episodios de precipitación usados en el Método Alternativo del Percentil 80	62
Referencias	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las precipitaciones máximas anuales.	12
Tabla 2. Condiciones geométricas de la zona.	12
Tabla 3. Parámetros de interés sobre la cuenca.	13
Tabla 4. Precipitación histórica a los 15 y 30 días previos a la lluvia.	22
Tabla 5. Resumen de los parámetros que intervienen en el Método de las Abstracciones.	23
Tabla 6. Parámetros de interés para el Método de Green-Ampt	24
Tabla 7. Resumen de parámetros usados de la Tabla 4.2. del Libro <i>Ingeniería Hidrológica</i> [8]	24
Tabla 8. Resumen de los valores de T_p para los tres tipos de suelo.	25
Tabla 9. Resumen de diferencias en la P_e y su repercusión sobre Q_t	26
Tabla 10. Valores del Mapa de Máximas Lluvias Peninsulares para la estación pluviométrica A10_Anzur	35
Tabla 11. Valores de D_{max} y D_{med} porcentual para el estudio estadístico.	37
Tabla 12. Resumen de la pérdida de información del Método de las 7am-7am	39
Tabla 13. Relación de P_{max}/P_{total} para los dos Métodos de hietogramas del estudio	40
Tabla 15. Resumen de los valores Q_p , Q_t , T_p actualizados para la acción climática prevista.	48
Tabla 16 Diferencia de variación de Q_p en cada una de las metodologías empleadas.	48
Tabla 17. Diferencia de variación de Q_{total} en cada una de las metodologías empleadas.	48
Tabla 18. Diferencia de variación de T_p en cada una de las metodologías empleadas.	49
Tabla 14. Resumen de los valores Q_p , Q_t , T_p para cada una de las metodologías empleadas.	51
Tabla 19. Histograma de diseño	53
Tabla 20. Pérdidas de precipitación según el Método de los Bloques Alternos.	55
Tabla 21. Pérdidas de precipitación según el Método Alternativo	56
Tabla 22. Diagrama de valores para el Método SCS	57
Tabla 23. Resultados de escorrentía (1) frente a la infiltración total (0).	59
Tabla 24. Resultados de las funciones de distribución para cada función estadística.	60
Tabla 25. Resumen comparativo de las diferentes funciones estadísticas.	61
Tabla 26. Precipitaciones usadas en el Método Alternativo del percentil 80.	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de la situación. [6]	11
Ilustración 2. Red hídrica modelada para la zona de estudio.	14
Ilustración 3. Mapa de elevaciones del terreno para la zona de estudio.	15
Ilustración 4. Mapa de estaciones pluviométricas	20
Ilustración 5. Evolución de las tres lluvias tipo escogidas para la calibración.	21
Ilustración 6. Ajuste del CN según el histórico de Pbruta en los 15 y 30 días previos.	23
Ilustración 7- Búsqueda de correlación entre el "tlag" y Pbruta del episodio	28
Ilustración 8. Búsqueda de correlación entre el "tlag" y Pbruta acumulado en los 30 días previos al episodio	28
Ilustración 9. Comparativa de hidrogramas. Caso de suelo húmedo	30
Ilustración 10. Comparativa de hidrogramas. Caso de suelo estándar	30
Ilustración 11. Comparativa de hidrogramas. Caso suelo seco	31
Ilustración 12. Dispersión del Tp en Green-Ampt según la humedad del suelo	32
Ilustración 13. Diagrama empleado en la metodología del análisis de sensibilidad	34
Ilustración 14. Primera fase del estudio: Funciones estadísticas de la precipitación.	35
Ilustración 15. Diagrama de la metodología empleada en el estudio	37
Ilustración 16. Hietograma de diseño según el Método de los Bloques Alternos	38
Ilustración 17. Hietograma para el Método Alternativo del percentil 80.	40
Ilustración 18. Mapa del CN desagregado en subtramos. Fuente: REDIAM [11]	42
Ilustración 19. Resultado del método de las abstracciones para Bloques Alternos.	43
Ilustración 20. Resultado del Método de las Abstracciones para el percentil 80 del histórico.	43
Ilustración 21. Diagrama de la metodología empleada en el estudio	45
Ilustración 22. Resumen de hidrogramas obtenidos respecto al valor de referencia (gris)	46
Ilustración 23. Resumen de las metodologías y opción óptima para el caso de estudio.	50
Ilustración 24. Errores relativos a la función de Kosmogolov para cada función estadística	61

1 INTRODUCCIÓN

El agua ha sido tradicionalmente uno de los recursos más importantes para la sociedad humana. Desde el inicio de las civilizaciones, las comunidades se han agregado en torno a las masas de agua disponibles a su alrededor para desarrollar su actividad. *“Las civilizaciones más avanzadas de la antigüedad florecieron en las llanuras de los grandes ríos: Amarillo (en China), Tigris y Éufrates (en la antigua Mesopotamia, actualmente Irak,) Nilo (Egipto) e Indo (en Pakistán)”* [3]

A lo largo de la historia se encuentran ejemplos de captación y gestión de este recurso para el uso público donde las construcciones civiles han encontrado un papel fundamental para la mejora de dichas actividades. Tal era la importancia de este bien que la navegación mercantil o la salubridad e higiene de las ciudades han formado parte de las razones por las que el ser humano demandaba este bien común.

Actualmente, este desarrollo humano no parece haber encontrado un límite. “En las últimas décadas, los ríos están perdiendo una parte importante del espacio que disponían para absorber las crecidas, como consecuencia de la ocupación de sus márgenes”. [4]

De la misma forma, parece haberse sumado a esta “prisa” social la estandarización de los estudios que abordan estos límites de inundación donde se sigue la misma metodología para cuencas con una distinta naturaleza y por tanto distinto comportamiento frente a crecidas.

A este hecho, se suma una respuesta climática frente a la acción humana sobre el equilibrio natural que hace más patente la necesidad de evitar futuros estudios generalistas que sigan justificando el avance humano sobre las zonas inundables y, en su defecto, buscar estudios con mayor grado de detalle.

Con el fin de evitar esta generalidad, se ha propuesto el siguiente Trabajo para analizar la sensibilidad de una subcuenca atlántica sobre las diferentes metodologías que suelen utilizarse en la actualidad. Entre ellas se incluyen los estudios de precipitaciones y el diseño complementario de un hietograma junto con el cálculo de infiltraciones para modelar finalmente un hidrograma de diseño.

Existen tres valores con los que la mayoría de los estudios hidrológicos cuentan para estimar un primer resultado acerca de la construcción de una obra civil: Caudal punta (Q_p), Caudal total (Q_t) y Tiempo pico (T_p). Para llegar a estos resultados, se sigue una metodología que aborda las siguientes fases de forma resumida:

1. Estudio estadístico para calcular una precipitación acorde a un periodo de retorno.
2. Elaboración de un hietograma para repartir dicho valor estadístico sobre un episodio de lluvia tipo.
3. Modelar el efecto de la infiltración del suelo sobre el hietograma.
4. Diseñar un hidrograma que describa la evolución de la entrada de escorrentía hallada previamente.

El objetivo que se persigue en este Trabajo es seguir estos mismos procedimientos con datos reales de

precipitación sobre una cuenca de la que se encuentran disponibles los datos de caudal con los que se podrán comparar los resultados de forma que pueda estimarse qué metodología es más conveniente para este caso y en qué grado se acerca el resultado del resto de metodologías. Los tres factores que se han considerado para cuantificar este análisis han sido Q_p , Q_t y T_p como se ha comentado anteriormente.

Dado que el alcance del estudio no incluye a otras zonas hidrográficas de España, se considerará su limitación en el uso generalizado de estos resultados para otras cuencas que cuenten con un comportamiento distinto al de la que ocupa. Puede tomarse de la misma forma, como iniciativa para considerar la particularización de los estudios hidrológicos como se hace en este Trabajo.

La estructura seguida en el TFG se compone de dos bloques diferenciados en esta memoria. En primer lugar, se calibran y validan los parámetros que caracterizan la cuenca en términos de geometría y uso de suelo según las propias correlaciones establecidas en este Trabajo a partir de datos facilitados por el S.A.I.H. del Guadalquivir [5]. Más adelante, se procede con el estudio hidrológico según los distintos métodos empleados en el sector para encontrar qué combinación de estos resulta más favorable para la cuenca. Por último, se calculan los errores porcentuales de cada método respecto a la referencia histórica y se proyectan estos mismos para un escenario climático a 100 años.

A partir de los errores cometidos entre cada metodología, se plantea la forma óptima de calcular futuros estudios hidrológicos para cuencas con el mismo comportamiento que la que ahora ocupa.

Resulta, por tanto, un Trabajo introductorio donde la línea de investigación se abre ahora sobre nuevas tipologías de cuencas y metodologías que no se hayan incluido en esta ocasión.

2 CONTEXTO: ZONA DE ESTUDIO Y TIPOLOGÍA DE LA CUENCA.

En este Trabajo se ha escogido la cuenca del río Anzur que pertenece al curso del río Guadalquivir siendo esta una cuenca atlántica. El estudio se ha realizado entre el periodo de lluvias de 2015 a 2021 con las estaciones pluviométricas gestionadas por el Sistema de Información Automática Hidrológica del Guadalquivir (S.A.I.H. del Guadalquivir [5]). La selección de periodo es limitada, pero no existe más información disponible de la misma. Al realizar el estudio de un periodo concreto y su calibración con caudales, se puede aceptar la poca información.

2.3. Tipología de la Cuenca

El río Anzur es un afluente que junto con el río Lucena llega al embalse de Cordobilla para sumarse al cauce del Genil tal y como se aprecia en la Ilustración 1. No encuentra grandes poblaciones a diferencia de su afluente hermano que provoca periódicas inundaciones al pueblo que le da nombre debido a la invasión de este sobre el espacio natural de inundación del río.

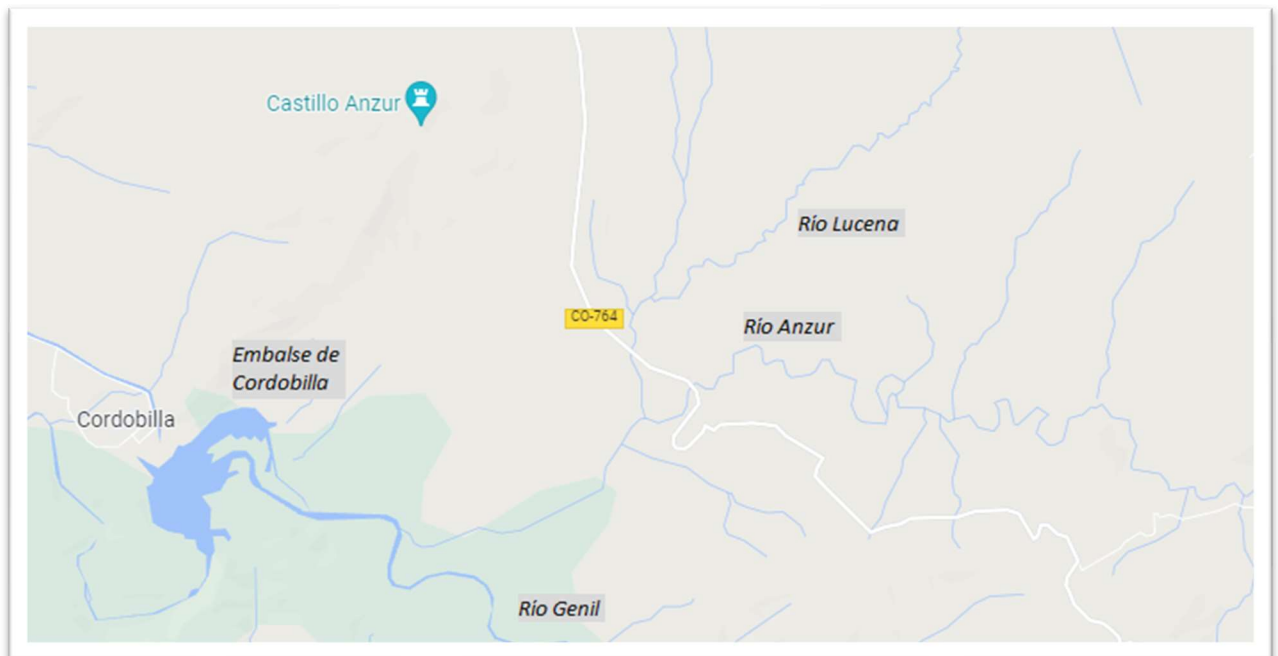


Ilustración 1. Mapa de la situación. [6]

Los episodios encontrados más recientes acerca de las inundaciones datan del 21 de septiembre de 2021 en la

localidad de Lucena donde han sido especialmente acusados. Según anuncia el diario Lucena Hoy: “*Hacia mucho tiempo que no llovía con tanta fuerza y persistencia en Lucena y los resultados no se han hecho esperar, transformando las calles en auténticos ríos, causando daños en el viario público y mobiliario urbano e inundaciones en empresas y viviendas.*” [7]

Alrededor de la zona existen construcciones en suelo inundable que sufren la presión del río en los periodos de lluvias más intensos y ocupan las portadas de los periódicos locales a la entrada del invierno de los últimos años. En la Tabla 1 se ofrece un resumen de las máximas precipitaciones ocurridas en los últimos años sobre la zona de estudio de forma que se puedan poner en contexto estos eventos.

<i>Años</i>	<i>Precipitación máxima anual [mm]</i>
2015	33.37
2016	37.95
2017	50.47
2018	41.63
2019	57.25
2020	35.47
2021	25.12

Tabla 1. Resumen de las precipitaciones máximas anuales.

2.1.1 Características geométricas de la cuenca

En la Tabla 2, se pueden observar algunas características geométricas de la cuenca de estudio a fin de poner en referencia los resultados que se obtendrán durante este Trabajo.

<i>Parámetro de la Cuenca</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Área de la cuenca del aforo</i>	295.75	km ²
<i>Longitud del tramo más largo</i>	50	km
<i>Distancia entre el punto de desagüe y el inicio</i>	32	km
<i>Sinuosidad</i>	1.56	
<i>Pendiente media del tramo</i>	0.024	
<i>Cota máxima</i>	1446	m
<i>Cota mínima</i>	251	m
<i>Tiempo de concentración</i>	11.92	h

Tabla 2. Condiciones geométricas de la zona.

A raíz de estos resultados, se puede describir algunos otros complementarios en la Tabla 3 para tratar de entender mejor las características físicas de nuestra cuenca.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Sinuosidad</i>	1.56
<i>Factor de forma</i>	0.12
<i>Índice de Gravellius</i>	1.67

Tabla 3. Parámetros de interés sobre la cuenca.

Donde el Índice de Gravellius acude a nivel descriptivo para definir similitud de la cuenca con la de la forma circular siendo esta el valor unidad. Por otro lado, la sinuosidad se ha definido a partir de la longitud real del tramo más largo respecto a la distancia entre los dos puntos extremos. Finalmente, el factor de forma es definido por el cociente entre el ancho de la cuenca y su longitud, de forma que un valor alto supondrá mayores crecidas para una misma área.

En nuestro caso, la cuenca se corresponde con una tipología alargada alejándose por tanto de una forma circular (Tabla 3), pero siendo una ventaja en términos capacidad de desagüe ya que su bajo factor de forma permite tener menor ancho de cuenca por cada kilómetro del eje longitudinal. Esta geometría puede observarse en la Ilustración 3.

Del mismo modo, se ofrecen en la Ilustración 2 y la Ilustración 3 un detalle de la geometría de la cuenca así como su red hídrica, donde se puede comprobar la forma alargada de la cuenca así como la baja sinusoidad de la misma ($S_i=1.56$).

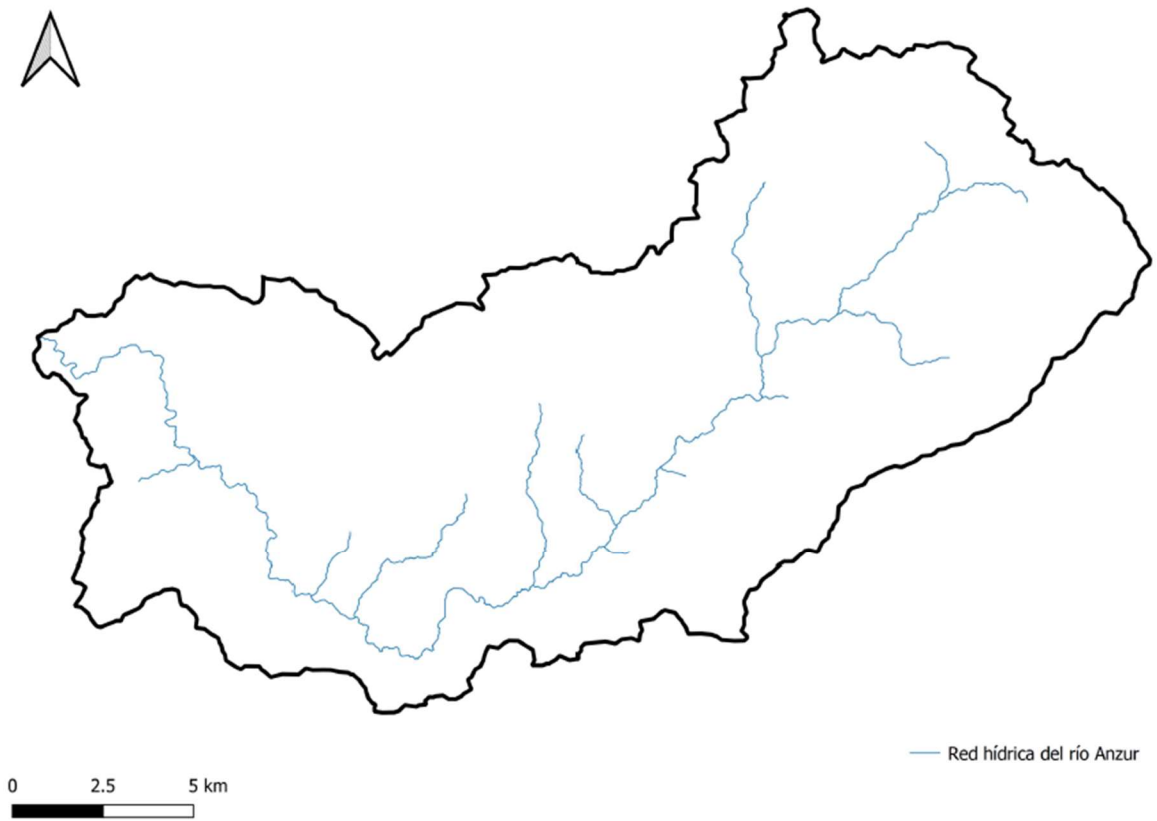


Ilustración 2. Red hídrica modelada para la zona de estudio.

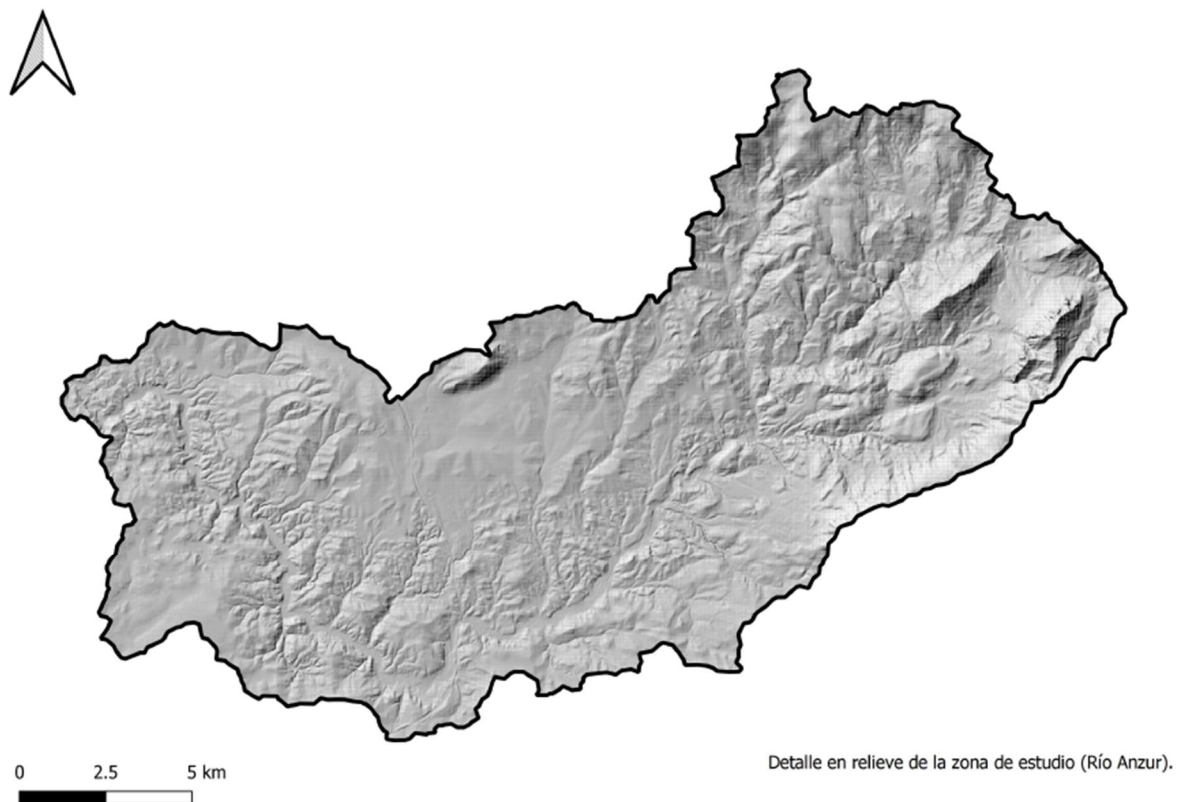


Ilustración 3. Mapa de elevaciones del terreno para la zona de estudio.

Una vez definido el contexto en el que se encuentra la zona, se va a desarrollar toda la metodología seguida para hallar las conclusiones acerca del Caudal punta (Q_p), Caudal total (Q_t) y Tiempo pico (T_p) que se ha comentado en la Introducción.

Para ordenar el estudio, se han dividido los pasos entre el Bloque I y Bloque II que se corresponderán con el calibrado y validación de las herramientas de uso y la puesta en marcha de estas respectivamente.

3 METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA ZONA DE ESTUDIO.

Actualmente los estudios hidrológicos se plantean según un hietograma de bloques alternos sacado a partir de la precipitación estadística deseada. Posteriormente se modela la infiltración del episodio sobre el suelo según varios métodos de abstracciones, SCS-CN como el más usados.

En este TFG se van a plantear una serie de alternativas que se compararán con las metodologías actuales para tratar de obtener una solución óptima para el caso de estudio, poniendo en duda de si el criterio generalizado es el correcto. Como vehículo de comparación se van a hacer uso de los tres parámetros mencionados con anterioridad en la Introducción: Caudal punta, Caudal total y Tiempo pico, ya que son datos obtenidos por el aforo A10_Anzur facilitado por el S.A.I.H. del Guadalquivir [5]. De esta forma se podrán cuantificar los resultados en base a estos tres valores.

Las alternativas propuestas son las siguientes:

1. Calibración previa de los parámetros asociados al Q_t , Q_p y T_p : CN, η , Θ_e , K, Coef 1 y Coef 2, a través de unas lluvias caídas (tiempo instantáneo).
2. Alternativa para el hietograma de diseño basado en el histórico local (estudio para periodos de retorno tanto de lluvias como de caudales): Método Alternativo del percentil 80.
3. Método de 7am-7am como estudio de precipitaciones tomando como hora común de inicio y cierre de toma de datos del episodio las 7:00.

Estas alternativas, junto con el resto de las metodologías mencionadas al inicio de este apartado, compondrán un árbol de posibilidades que se estudiarán y compararán en base al Q_t , Q_p y T_p caso por caso para encontrar la línea de acción óptima para la zona de estudio.

3.1 Calibración previa de los parámetros asociados al Q_t , Q_p y T_p

Para poder contar con unos resultados lo más ajustados posibles a la realidad histórica de caudales con la que se comparará cada metodología, debemos de ajustar previamente todos los parámetros asociados a éstas que son CN, η , Θ_e , K, Coef 1 y Coef 2.

3.1.1 Número de curva (CN). Método de las Abstracciones

Se debe de tomar el total de precipitación caída en los últimos 15 y 30 días para el mayor número de episodios posibles (se recomienda al menos tres) con distintos valores de precipitación caída. De esta forma se asegura que se cuenta con distintas ocasiones donde el suelo recibe la lluvia con diferente humedad.

Una vez se tienen los episodios de lluvia referenciados con el histórico de 15 y 30 días, se desarrolla el Método de las Abstracciones para cada uno de los episodios hasta llegar al hidrograma SCS. Llegados a este punto, se calibra el CN de forma que coincida el valor total del caudal caído en el episodio con el registro real del S.A.I.H del Guadalquivir.

Dado que los Coef 1 y Coef 2 no afectan al valor del Caudal total, estos no son necesarios de conocer con exactitud para poder calibrar dicho valor.

Una vez se tienen los valores del CN ajustados para cada episodio, se elabora una gráfica donde ponga en ambos ejes la precipitación caída en los últimos 15 y 30 días y el valor del CN adoptado. Se encontrará una regresión lineal que permitirá concluir con un número de curva más preciso que justifique la adopción de esta metodología en el futuro.

3.1.2 Calibración de η , Θ_e y K. Método de Green-Ampt

Para la calibración de los parámetros asociados al Método de Green-Ampt se procede de forma análoga al Método de Curva (CN). En primer lugar, se halla el histórico de precipitación acumulada para los 15 y 30 días previos al episodio caracterizando un total de tres como mínimo (suelo húmedo, estándar y seco). En segundo lugar, partiendo de los datos de η , Θ_e y K consultados en la bibliografía, se ajustan los valores hasta hacer coincidir el Q_t del modelo de infiltración con la referencia histórica de caudales.

Para consultar los parámetros de infiltración, se deben de hacer uso las tablas ofrecidas en el libro Ingeniería Hidrológica [8] para el capítulo dedicado a este método. De forma complementaria, debe de acudirse a la Carta Magna 50 asociada a la zona de estudio en el IGME [9] para poder caracterizar con mayor fiabilidad los parámetros de infiltración.

Una vez se cuentan con los rangos aproximados de η , Θ_e y K, se iteran hasta hacer converger la solución de caudales con el histórico.

Para este caso de estudio, el método de calibración no ha encontrado buenos resultados para Green-Ampt de modo que se ha descartado como alternativa previamente. Los resultados de dicha calibración se encontrarán detallados en el apartado 4.1.2.

3.1.3 Coef 1 y Coef 2. Ajuste del t_{lag}

El Coef1 y Coef2 se corresponden con los valores que multiplican a la Duración y Tiempo de concentración del episodio y la cuenca respectivamente para obtener el T_p en cada solución. De este modo, el T_p variará según el ajuste que se realicen sobre estos parámetros. Para ello, se expondrá a continuación la solución seguida.

En primer lugar, se debe observar el tiempo transcurrido entre la máxima precipitación y caudal en los episodios escogidos previamente en el apartado anterior ya que este valor será el que se asigne al t_{lag} . En el caso de que exista una dispersión de resultados, se debe tratar de encontrar una relación con la forma de la

cuenca y la duración de la lluvia. ¿Qué evolución sigue la precipitación media sobre qué forma de cuenca? Estos razonamientos ayudarán a entender como modelar el T_p .

En este caso, el valor de Coef 1 y Coef 2 se ha ajustado a un rango que más tarde ha permitido elaborar el hidrograma de acuerdo con el hidrograma real, aunque no de forma definitiva. Se propone por tanto un estudio que encuentre una correlación entre la forma de la cuenca, la humedad del suelo (Total de precipitación caída en los últimos 15 y 30 días) y la evolución media de las precipitaciones sobre la cuenca.

3.2 Estudio de alternativas entre las diferentes metodologías de estudio

Una vez se han calibrado los parámetros asociados a la zona de estudio, se presentan cuatro bloques para el estudio de metodologías: Estudio de precipitaciones, Hietogramas, Estudio de Infiltraciones e Hidrogramas.

3.2.1 Estudio de precipitaciones

En el estudio de precipitaciones han participado las siguientes distribuciones estadísticas: Weibull, Normal, EVI, Log-Pearson tipo III y SQRT-ET max. Cada uno de ellos se usará para el periodo de retorno escogido en el TFG: 100 años.

Conjuntamente, se ha consultado el Mapa de Máximas Lluvias Peninsulares (CEDEX [1]) para contar con un punto de referencia adicional sobre los estudios estadísticos mencionados anteriormente.

El siguiente paso es realizar el Test de Kosmogolov para todas las distribuciones de forma que cada distribución tenga una desviación máxima (D_{max}). La función estadística asociada a la menor D_{max} será la que se usará como precipitación de diseño. Sin embargo, se ha comprobado que una desviación porcentual media de todos los valores asociados a cada función (D_{med} (%)), y no solo el máximo (D_{max}), se ajusta mejor a la zona de estudio.

Para concluir con que este método arroja mejores resultados de forma generalizada para las funciones estadísticas, se debe de abrir el estudio a más tipologías de cuencas en futuras líneas de investigación.

3.2.2 Hietogramas

En este apartado se compararán tres métodos:

1. Método de los Bloques Alternos
2. Método Alternativo basado en el percentil 80

3. Método de 7am-7am

El método de los Bloques Alternos consistirá en orientar los bloques horarios de precipitación según las celdas pares y a continuación las impares de la precipitación incremental resultante del método. Esta solución es ampliamente usada en el sector y se comparará con los dos siguientes métodos en este TFG.

El método Alternativo consiste en recoger el percentil 80 de los eventos de precipitación de la zona según la Pbruta caída y realizar una media ponderada de todos los eventos según cada tramo horario. De esta forma, se consigue tener una evolución media o “más probable” de la intensidad horaria para un evento caído en la zona de estudio. El objetivo que persigue este método es el de trabajar con datos más cercanos a la realidad local de la zona de estudio tal y como se ha comentado en la Introducción de este trabajo.

Por último, el método de las 7am-7am es el más sencillo por su facilidad y rapidez a la hora de mostrar los resultados. Consiste en tomar como inicio y fin del episodio la hora local de las 7:00 de forma que se cuente con un criterio uniforme para todos los episodios que se incluyen.

3.2.3 Estudio de infiltraciones

En este trabajo se han contado con dos métodos de infiltración de lluvia: SCS-CN y Green-Ampt. El motivo por el cual se han escogido estas soluciones es por su popularidad y facilidad de uso.

El método de las Abstracciones SCS-CN parte del CN hallado previamente en la calibración para modelar las pérdidas por infiltración. El cálculo de la precipitación efectiva se hará por tanto para cada caso de hietograma visto en el apartado anterior: Método de los Bloques Alternos y Método Alternativo. El Método de 7am-7am se ha descartado por no recoger al completo la precipitación bruta en la mayoría de los eventos.

El método de Green-Ampt define un límite de encharcamiento para el cual empieza a producirse escorrentía. En cada tramo horario la intensidad de precipitación indicará si existe o no precipitación efectiva (P_e) según sea mayor o menor que dicho límite. Así, se han modelado los dos hietogramas de diseño (Bloques Alternos y Método Alternativo) para cada caso obteniendo un valor de P_e en cada solución.

Llegados a este punto, contamos con cuatro valores de P_e según cada combinación de entre los distintos métodos. A continuación, se verán los hidrogramas resultantes en cada metodología.

3.2.4 Hidrogramas

Finalmente, se procede a calcular con el método SCS los hidrogramas de cada metodología vista. Tal y como se ha comentado en la Introducción, los parámetros de control para decidir si un método es más acertado que otro son el Q_p , Q_t y T_p de modo que será en estos donde nos fijaremos para poder comparar las distintas soluciones según su diferencia con el histórico de referencia.

4 BLOQUE I: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS.

Para abordar con exactitud el análisis de cada una de las metodologías que se presentan en el TFG, se han calibrado previamente los parámetros que dependan implícitamente del Caudal punta, Caudal total y Tiempo pico: CN , η , Θ_e , K , Coef 1 y Coef 2

Tras hacer este proceso, se ha comprobado que la calibración puede ser independiente de T_p frente al Q_t y Q_p y que depende únicamente de parámetros referidos a los Métodos de infiltración para el último caso. Por ello, se va a analizar los parámetros de infiltración y del tiempo pico de forma separada en los apartados 0 y 4.2.

La dinámica que se va a seguir para el ajuste es siempre la misma. Se seleccionan tres episodios de lluvias registrados en las estaciones descritas en la Ilustración 4 (Periodo de suelo seco, estándar y húmedo) junto con sus caudales recogidos. Estos caudales se comparan con el hidrograma generado a partir de los estudios estadísticos para un caudal estadístico con periodo de retorno de 100 años. El calibrado consistirá en corregir los parámetros mencionados previamente para converger ambas soluciones de hidrogramas.



Ilustración 4. Mapa de estaciones pluviométricas

Cabe decir que para la calibración se ha utilizado el periodo de suelo húmedo mientras que para la posterior validación se encuentran los dos otros episodios (suelo estándar y seco). Esto se ha tomado de esta forma ya que nuestro caso de estudio recoge un histórico de hidrograma con dos puntas y se hace más notorio considerar por tanto el episodio en el caso de suelo húmedo.

4.1 Ajuste de los parámetros para los Métodos de Infiltración

Se han seleccionado dos formas para el cálculo de la infiltración. Por un lado, el Método de las Abstracciones con CN (Número de Curva) como parámetro fundamental y por otro el Método de Green-Ampt que depende de distintos valores según el tipo de suelo en términos de conductividad hidráulica fundamentalmente y demás valores mencionados en la Tabla 6.

La razón por la que se han escogido ambos métodos es por su popularidad dentro del sector ya que son de los más usados y a la vez encuentras diferencias en su naturaleza de modelaje frente a las infiltraciones. Esta diferencia reside en la forma de distribuir la abstracción inicial donde el Método SCS-CN opta por una proporción mucho mayor al inicio del episodio y el Método de Green-Ampt distingue entre cada bloque horario para decidir si se produce o no escorrentía. El detalle de las ecuaciones se verá en los próximos apartados para cada método empleado.

Para realizar el ajuste se ha tomado tres episodios tipo con unas condiciones de suelo húmedas, estándar y secas con el fin de tomar una buena correlación de los resultados y evitar líneas de regresión horizontales. En la Ilustración 5 puede observarse la evolución de estos episodios que cuentan con un remonte de los valores tras el primer pico siendo estos de 4.3 mm a las 20h en suelo seco, 1.27mm a las 16h en suelo estándar y 5.75mm a las 15h en suelo húmedo. Este fenómeno implica un mayor riesgo de inundación para la zona ya que lo recibe un suelo ya saturado y muy dado a la escorrentía.

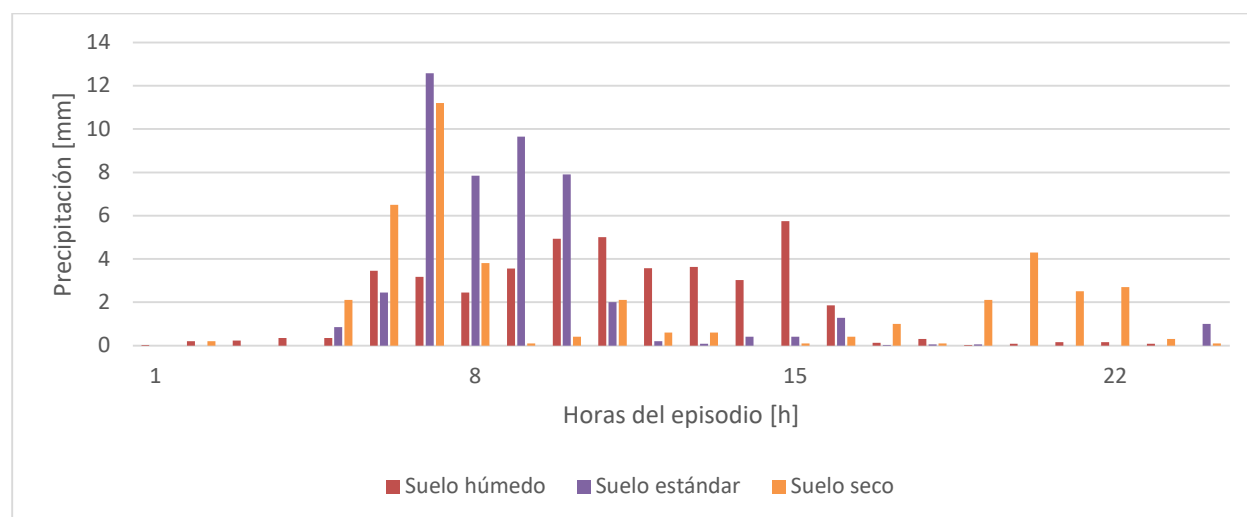


Ilustración 5. Evolución de las tres lluvias tipo escogidas para la calibración.

A modo orientativo, se exponen ahora los valores de precipitación acumulada en la Tabla 4 para los últimos 15 y 30 días del cada episodio con el fin de poner en contexto lo que se ha tomado por un suelo húmedo, estándar y seco en el estudio. Para tomar referencia, la precipitación media en episodios de lluvia para un periodo de 15

y 30 días respectivamente sobre la zona de estudio se encuentra en 43.5 mm y 87 mm.

	<i>Suelo húmedo</i>	<i>Suelo estandar</i>	<i>Suelo seco</i>
<i>P (15 días)</i> <i>[mm]</i>	207.25	59.30	15.37
<i>P (30 días)</i> <i>[mm]</i>	242.27	83.03	18.85

Tabla 4. Precipitación histórica a los 15 y 30 días previos a la lluvia.

4.1.1 Calibración del CN. Método de Infiltración: SCS-CN

A continuación, se verán los términos dependientes explicados en la introducción del Bloque I hecho sobre el Caudal punta y Caudal total para llegar a la conclusión de que solo es necesario calibrar el parámetro CN en la alternativa del Método de las Abstracciones SCS-CN.

Para hacer este ejercicio se han definido todas las fórmulas que intervienen, en primer lugar el Caudal total de avenida (Q_t):

$$Q_t = \sum Q_{scs} (i) [m^3/s]$$

Siendo $Q_{scs} (i)$ el producto de multiplicar los caudales que se incorporan junto al Anexo 3 y el Caudal punta (Q_p).

$$Q_p = \frac{0.208 * A * P_e}{T_p} [m^3/s]$$

Donde el Área ($A [km^2]$), la Precipitación efectiva ($P_e [mm]$) hallada como el total de las precipitaciones efectivas incrementales de cada diferencial de tiempo (dt) del Método de las Abstracciones y el Tiempo pico ($T_p [h]$) son los parámetros que intervienen en la expresión del Caudal punta ($Q_p [m^3/s]$).

$$T_p = Coef1 * D + Coef2 * T_c [h]$$

El caso de T_p no afectará al cálculo del Caudal total (Q_t) ya que pese a estar dentro de su expresión, se anula más tarde al multiplicarse en la tabla del Anexo 3 que dispone los valores de tiempo según T_p .

A modo de resumen, se reúnen en la Tabla 5 los parámetros descritos por las expresiones anteriores y que serán los que deberán distinguirse entre datos propios de la cuenca u objetos de calibración y validación por ser de elección propia del autor.

<i>Parámetros de interés</i>	<i>Factores que intervienen</i>
<i>Caudal Total (Qt)</i>	Pbruta, CN y A
<i>Caudal Punta (Qp)</i>	Pe, Tp, A
<i>Tiempo Pico (Tp)</i>	Duración de la lluvia, Tiempo de Concentración, Coef 1, Coef 2.
<i>Precipitación Efectiva (Pe (auxiliar))</i>	Pbruta, CN

Tabla 5. Resumen de los parámetros que intervienen en el Método de las Abstracciones.

Dado que los valores de precipitación caída durante el episodio (Pbruta) y el área de la cuenca ya vienen impuestos por el episodio, lo único a determinar y que es objeto de discusión es el número de curva (CN) ya que el Tp será objeto de análisis posteriormente en el apartado 4.2.

De este modo, se ha ido modificando el valor de CN hasta que el volumen de m³ que ofrecía el hidrograma generado bajo los mismos pasos que se van a tomar más tarde en esta metodología coincidía con el caudal real histórico registrado durante ese episodio. Paralelamente se ha tomado nota de los milímetros de lluvia caída 15 y 30 días antes de cada episodio con el fin de determinar la humedad con la que recibía la cuenca para cada episodio de lluvia.

Finalmente, se encontró una correlación entre estos dos valores de CN y la Pbruta en los 15 y 30 días previos a cada episodio con un coeficiente de ajuste de R² (15 días) = 0.97 y R² (30 días) = 0.99.

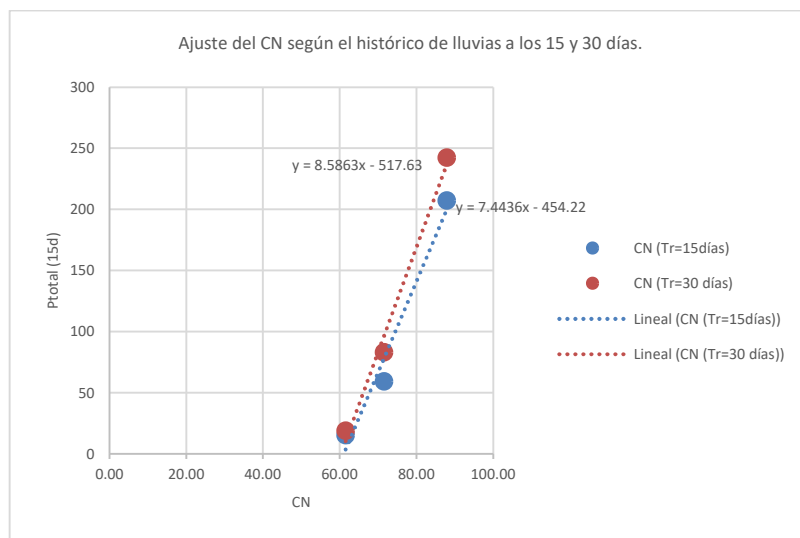


Ilustración 6. Ajuste del CN según el histórico de Pbruta en los 15 y 30 días previos.

Finalmente, se hace uso de la ecuación descrita por la regresión lineal para hallar el valor de CN según futuros episodios en los que previamente se halla determinado la Pbruta a los 15 y 30 días.

4.1.2 Calibración de η , Θ_e y K. Método de infiltración: Green-Ampt

El Método de Green-Ampt recoge los mismos parámetros que en el Método de las Abstracciones salvo el CN que es sustituido por los distintos parámetros que se ven a continuación. En la Tabla 6 se ofrece un resumen análogo al del apartado anterior para situar los términos dependientes en Green-Ampt.

<i>Parámetros de interés</i>	<i>Factores que intervienen</i>
<i>Caudal Total (Q_t)</i>	Pbruta, η , Θ_e , K y A
<i>Caudal Punta (Q_p)</i>	Pe, Tp, A
<i>Tiempo Pico (T_p)</i>	D, Tc, Coef 1, Coef 2.
<i>Precipitación Efectiva (Pe (auxiliar))</i>	Pbruta, η , Θ_e y K

Tabla 6. Parámetros de interés para el Método de Green-Ampt

Los parámetros de la Tabla 6 referentes a la infiltración se recogen en la Tabla 4.2 del Libro “Ingeniería Hidrológica” [8] como son la porosidad “ η ”, porosidad efectiva “ Θ_e ” y la conductividad hidráulica o permeabilidad “K” que obtienen los valores de la Tabla 7 para el caso de *Arcillas Arenosas* y *Margas Arcillosas*

*El uso de *Arcillas Arenosas* y *Margas Arcillosas* se ha consultado para el caso de estudio en el Magna 50 del Instituto Geológico y Minero de España [9]. En el Trabajo se ha optado por realizar una media ponderada de ambos suelos para ser coherentes con la información ofrecida de dicha fuente.

<i>Parámetro</i>	<i>Arcillas Arenosas</i>	<i>Margas Arcillosas</i>
<i>Porosidad</i>	0.43	0.453
<i>Porosidad efectiva</i>	0.321	0.412
<i>Conductividad hidráulica [cm/h]</i>	0.06	1.09

Tabla 7. Resumen de parámetros usados de la Tabla 4.2. del Libro *Ingeniería Hidrológica* [8]

Adicionalmente se debe definir la saturación efectiva “Se” para el suelo con la siguiente expresión.

$$Se = \frac{\text{humedad disponible}}{\text{máximo contenido de humedad posible}} = \frac{\theta - \theta_e}{\eta - \theta_r}$$

Donde la diferencia $\eta - \theta_r$ es la porosidad efectiva θ_e y θ_r es la humedad residual que se define como el contenido de humedad después de haber drenado completamente el suelo.

En el caso del método de Green-Ampt se ha procedido de forma análoga al Método de las Abstracciones, pero en este caso siendo la conductividad hidráulica “K” el objeto de ajuste.

Tras realizar varios intentos modificando “K” con el fin de llegar a volúmenes de escorrentía (Qt) del hidrograma similares a los valores históricos se ha llegado a la conclusión de que esto no es posible debido a varios motivos.

En primer lugar, el verdadero motivo por el cual no se asemejan estos valores no es por la permeabilidad del suelo si no por la forma en la que el propio método discrimina entre horas de escorrentía o de total infiltración sobre el terreno. Debido a que la intensidad de lluvia horaria debe superar un límite (definido por la permeabilidad) que se corresponde con la capacidad de infiltración en el suelo durante esa hora, muchas de estas horas no se ven encharcadas y por tanto la precipitación efectiva “Pe” en estas celdas de la tabla es nula (Pe=0). Esto provoca que la duración de la lluvia efectiva sea mucho menor (a veces del orden de magnitud) frente al Método de las Abstracciones y por tanto se distorsione el resultado del Tp tal y como se observa en la Tabla 8.

<i>Metodología</i>	<i>Tp [h]</i>		
	Suelo húmedo	Suelo estándar	Suelo seco
<i>SCS-CN</i>	9.97	6.63	9.60
<i>Green-Ampt</i>	6.51	4.13	2.00

Tabla 8. Resumen de los valores de Tp para los tres tipos de suelo.

De este modo, la Pe se ve concentrada en pocas horas (2 a 5h frente a las 18h del Método de las Abstracciones para episodios de 24h) donde sí supera el límite de infiltración, en el rango de 0.2-0.5 mm/h, y puede provocar escorrentía.

En el Anexo 4, se detallan los resultados del Método de Green-Ampt para una variación porcentual de los

parámetros del suelo tomando un porcentaje del 80%-95% de Arcillas Arenosas frente a las Margas Arcillosas tal y como se reflejaban en la Carta Magna 50 ofrecida por el IGME [9].

Pese a que el Método de las Abstracciones SCS-CN modela las primeras horas del episodio de lluvia con nula escorrentía ($P_{bruta}=I_a$), el resto de las horas del episodio si describe una escorrentía en términos porcentuales respecto a la P_{bruta} tal y como ocurre en la realidad. Por otro lado, el Método de Green-Ampt no describe en ningún momento la “Pe” en términos porcentuales de “ P_{bruta} ” si no que esta debe de superar una intensidad horaria, lo cual representa en punto clave de distorsión de resultados que se observan en la Tabla 8.

El caudal total se ve reducido de base por la poca precipitación efectiva (Pe) resultante del Método de Green-Ampt tal y como se observa en la Tabla 6 donde el Caudal total (Qt) es función de la precipitación Pe y ve reducido su valor hasta un 46% respecto a la referencia histórica. Así, la reducción de la Pe y por tanto del Caudal total se puede observar en la Tabla 9.

	Pe [mm]	Qt [m^3/s]	%error Qt
<i>Q100 referencia</i>		2791.41	
<i>SCS-CN + Método Alternativo</i>	34.44	2792.30	0%
<i>SCS-CN + Bloques Alternos</i>	31.14	2525.35	-10%
<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	23.42	1898.64	-32%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	18.47	1497.77	-46%

Tabla 9. Resumen de diferencias en la Pe y su repercusión sobre Qt

Los valores de caudal representados en la Tabla 9 ven reducidos sus Qt respecto a la referencia histórica en hasta un 46%. Cabe decir que, mientras que el Método SCS-CN no alcanza un valor del error relativo a Q100 mayor que un 10%, en el caso de Green-Ampt sus errores llegan a ser bastante superiores (32% en el Hietograma de los Bloques Alternos y 46% en el Método Alternativo del percentil 80).

4.2 Calibración del Tiempo pico (T_p). Parámetros empleados: Coef1 y Coef2.

En este apartado se pretende calibrar el Coef1 y Coef2 para obtener un resultado ajustado a la zona de estudio del T_p . Lamentablemente no se ha encontrado una correlación fiable de estos parámetros con los datos históricos del S.A.I.H. del Guadalquivir tal y como se ha hecho en el apartado anterior, siendo su R^2 [0.101,0.31] para los dos casos que aparecen en la Ilustración 7 y la Ilustración 8.

A continuación, se van a mostrar los valores obtenidos para el Coef1 y Coef2 en nuestra zona de estudio y posteriormente el proceso de correlación seguido para tratar de hallar un método de calibración.

De la misma forma que en el apartado 4.1.1, el primer paso ha sido deducir los términos dependientes del T_p .

$$T_p = Coef1 * D + Coef2 * T_c$$

$$T_p = \text{Tiempo pico [h]}$$

$$Coef1, Coef2 = \text{Coeficientes de ajuste}$$

$$D = \text{Duración de la lluvia efectiva [h]}$$

$$T_c = \text{Tiempo de concentración [h]}$$

Para el caso del Coef 2 se ajusta su valor según el tiempo transcurrido entre la máxima precipitación y el máximo caudal mientras que el Coef 1 debe de ser contrastado con la evolución de otros hidrogramas similares ocurridos sobre la cuenca. De esta forma, se pretende hacer coincidir en primer lugar la punta del hidrograma con los valores reales ya que este punto es el más significativo del hidrograma. En segundo lugar, se buscará modelar el Coef 1 y Coef 2 para tratar de adecuar la cola del hidrograma lo máximo posible con la realidad.

De forma estimativa, los resultados que se ofrecen para el caso de la cuenca del río Anzur corresponden con el siguiente rango para ambos coeficientes:

$$Coef 1 \sim [0.2, 0.35]$$

$$Coef 2 \sim [0.16, 0.34]$$

Una vez obtenidos el rango de valores aceptable para calibrar nuestro T_p , se han buscado algunas correlaciones para automatizar este proceso en base a los datos del S.A.I.H. del Guadalquivir. En la Ilustración 7 y la Ilustración 8 se muestran los resultados obtenidos para estos parámetros en base a seis episodios de lluvias de distinta índole. Como puede observarse, la precisión no es suficiente para ser considerada (R^2 [0.101,0.31]).

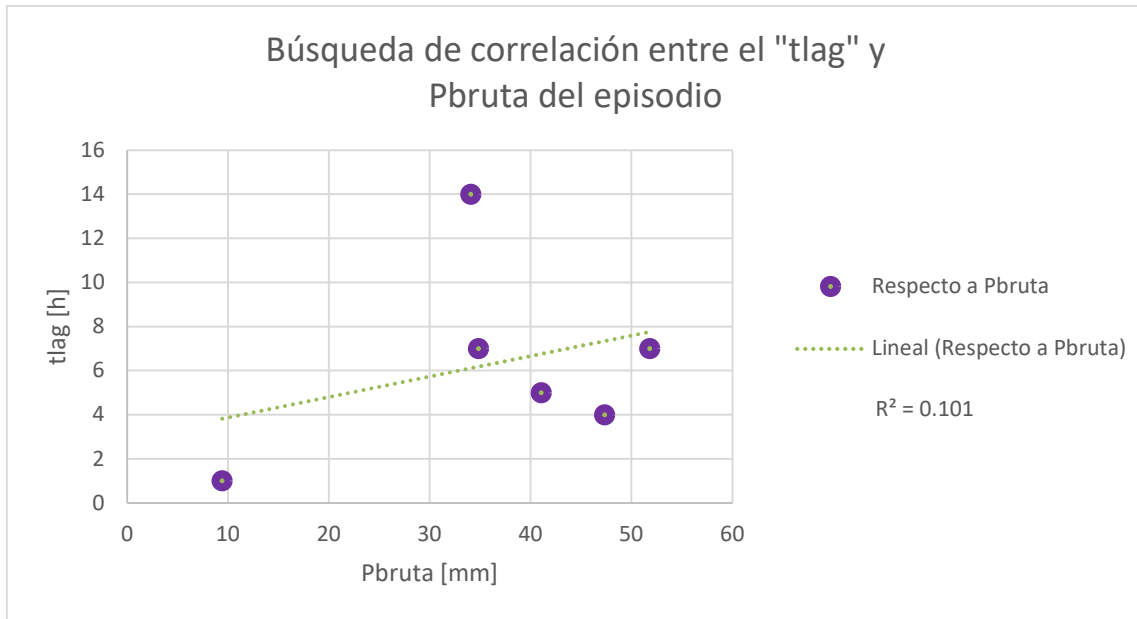


Ilustración 7- Búsqueda de correlación entre el "tlag" y Pbruta del episodio

En la Ilustración 7 se observa una distribución de valores de tlag de 4-14h para valores de Pbruta entorno a los 30-50mm caídos en el evento. Resumiendo todos los valores en una recta de regresión, se obtiene un $R^2=0.101$.

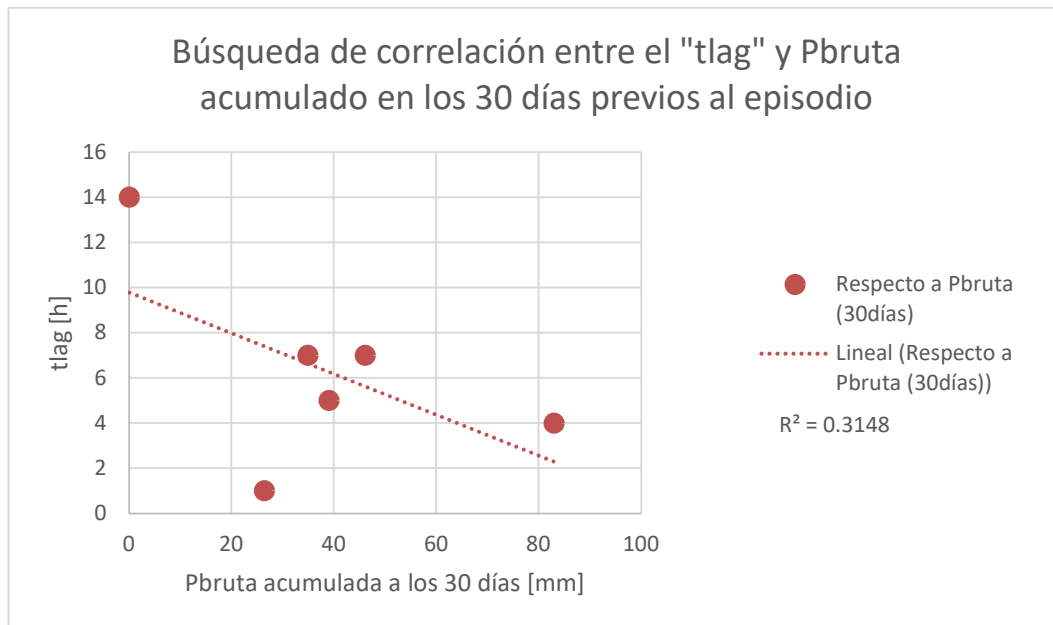


Ilustración 8. Búsqueda de correlación entre el "tlag" y Pbruta acumulado en los 30 días previos al episodio

Tal y como se observa en la Ilustración 8, los valores de tlag son los mismos que en la Ilustración 7 sin embargo la Pbruta difiere al recogerse esta vez los últimos 30 días previos al episodio. De esta forma, la correlación existente se comporta mejor que a los 15 días previos ya que encontramos un $R^2= 0.315$.

Como puede observarse en la Ilustración 7 y la Ilustración 8, existe cierta tendencia entre estos dos factores debido a que tanto la humedad del suelo provocado por los episodios previos de lluvia como el propio episodio puede afectar al valor del *tlag* que se corresponde por la expresión:

$$tlag = Coef\ 2 * Tp$$

Para sacar mejores conclusiones acerca de esta cuestión se recomienda iniciar una campaña más amplia de calibración que incluya la recogida de lluvias en distintas zonas del territorio incluyendo el área de la cuenca a los dos factores anteriores para así poder deducir una correlación que permita apoyar futuros estudios. El valor de R^2 por tanto debe de ser mayor al obtenido actualmente R^2 [0.314, 0.101] para adoptar una regresión lineal como fuente de información.

En nuestro caso, al tratarse de episodios con cierta dispersión tal y como se ve en la Ilustración 7 y la Ilustración 8, el número de eventos ha resultado insuficiente y por tanto adopta un valor de R^2 bajo como se acaba de mencionar.

4.2.1 Conclusión. Resumen de hidrogramas para los tres episodios usados en la calibración.

Una vez se ha concluido con la calibración, el objetivo debe ser tener ajustados los hidrogramas de cada metodología con el histórico tomado de referencia en cada caso de suelo húmedo, seco y estándar.

Tal y como se detalló en el apartado 4.1.2, los resultados del Método de Green-Ampt se ven distorsionados y dejan un resultado menor del real en la duración “D” y por tanto en el valor del Tiempo pico (T_p). Si se hace uso de los Coef1 y Coef2 obtenidos previamente, se obtienen los valores de la Tabla 8 para T_p para las dos metodologías empleadas.

Teniendo en cuenta que los resultados del método SCS-CN sí se corresponden con el histórico, la diferencia de este con el Método de Green-Ampt será la diferencia con el histórico. En este caso, la media de estas diferencias entre los tres tipos de suelo (húmedo, estándar y seco) se corresponde con un 50.23% por debajo en el caso de Green-Ampt respecto a la realidad.

Del mismo modo, se puede comprobar este fenómeno sobre los hidrogramas resultantes de cada tipo de suelo de la Ilustración 9, Ilustración 10 e Ilustración 11.

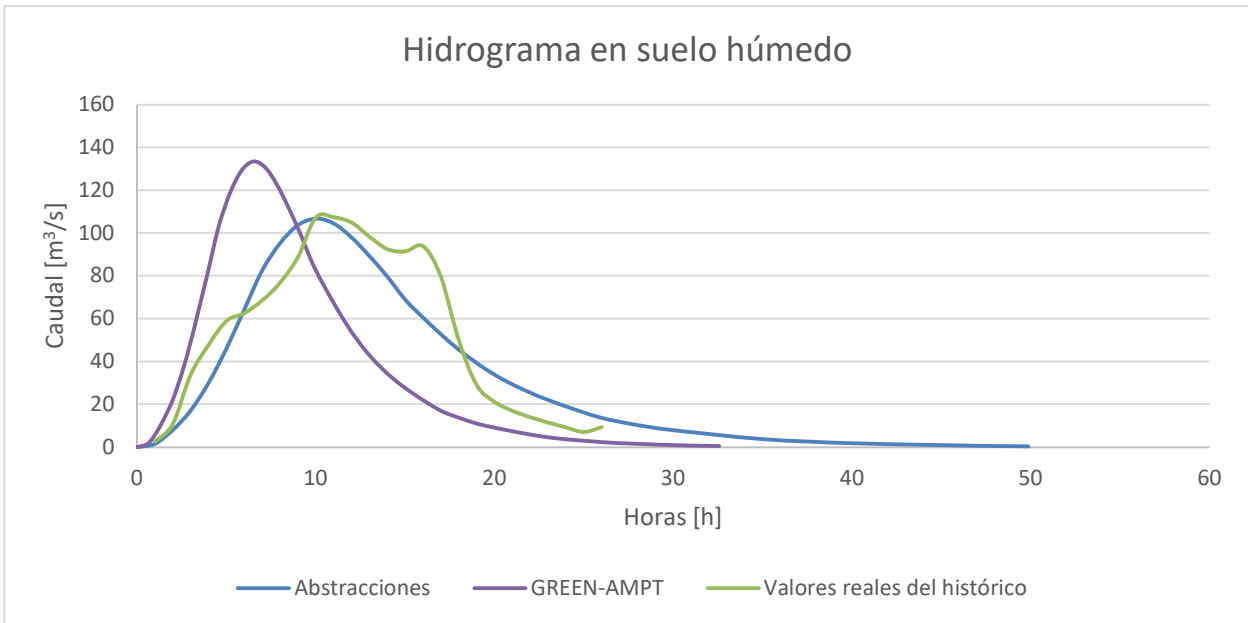


Ilustración 9. Comparativa de hidrogramas. Caso de suelo húmedo

En la Ilustración 9 se observa que el Método de Green-Ampt alcanza un Q_p de $130.78 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que el Método SCS-CN y la referencia histórica se encuentran en $107.23 \text{ m}^3/\text{s}$ lo cual supone un 22% superior para el primer método.

Por otro lado, el valor del Tiempo pico (T_p) se corresponde con las 10.5 h en el caso de la referencia histórica junto con el Método SCS-CN mientras que en el Método de Green-Ampt se ve reducida un 35% (7.16 h).

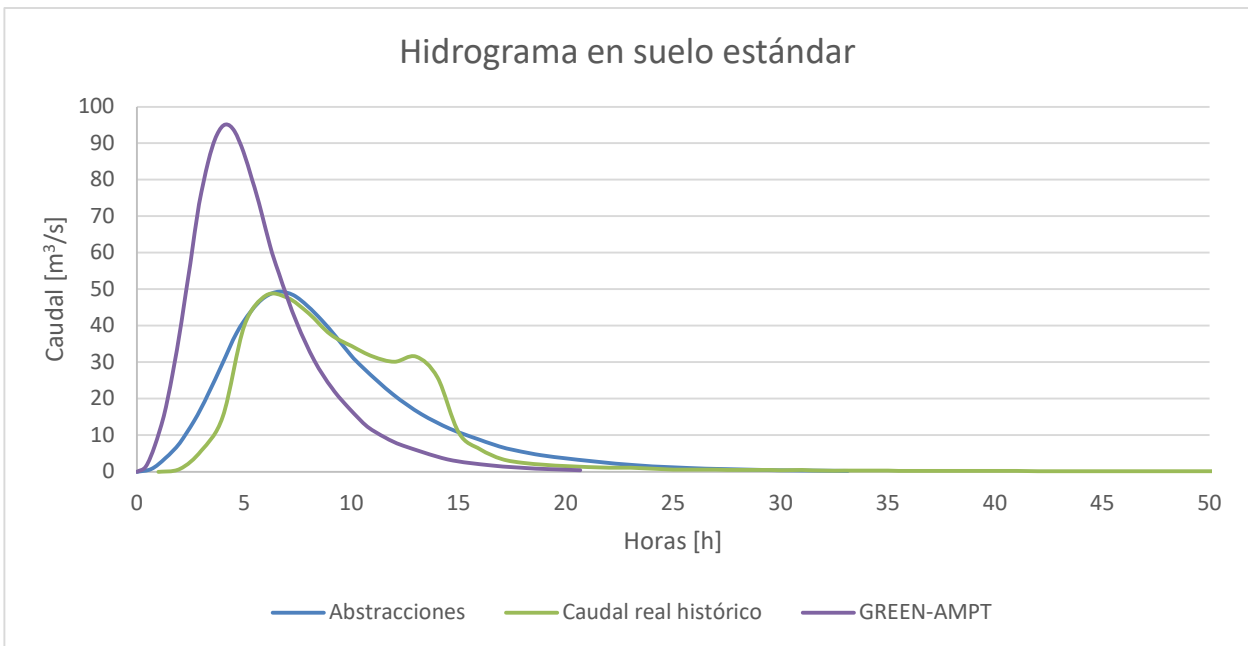


Ilustración 10. Comparativa de hidrogramas. Caso de suelo estándar

Para la situación de suelo estándar los valores del Caudal punta se vuelven a distorsionar en el caso del Método de Green-Ampt hasta un 93% por encima de la referencia histórica (48.28 m³/s) mientras que la diferencia en términos del T_p se mantiene estable respecto al caso anterior (38% reducida respecto a la referencia histórica).

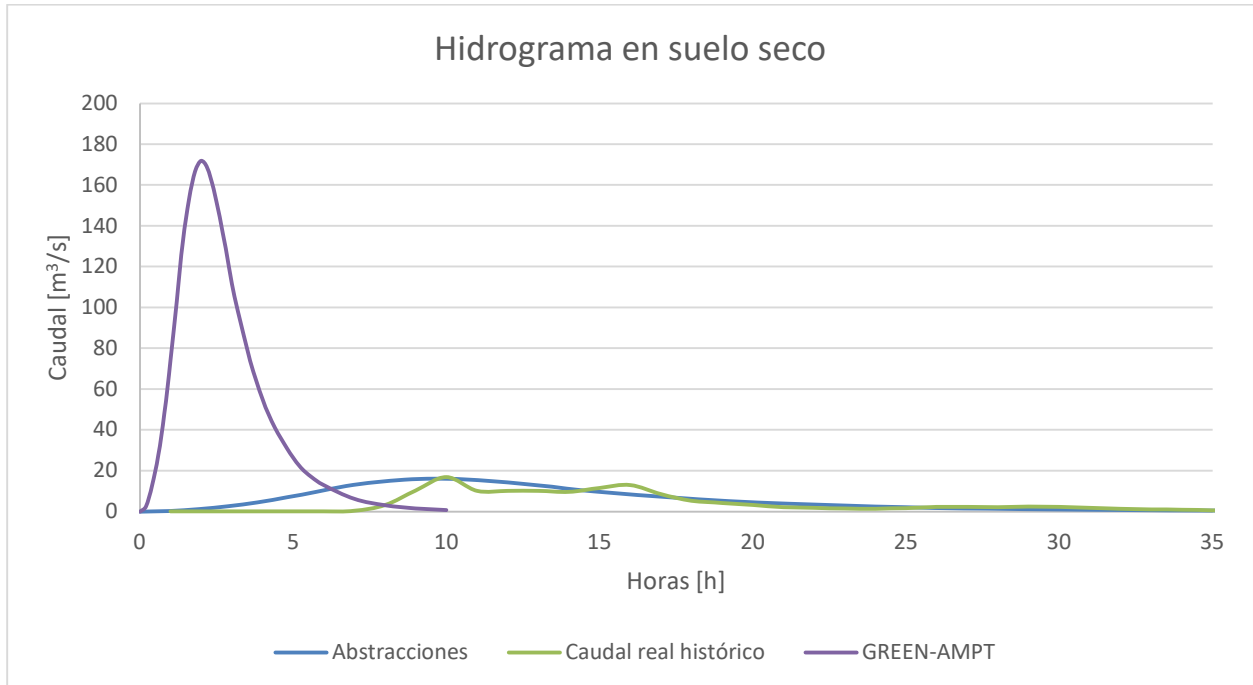


Ilustración 11. Comparativa de hidrogramas. Caso suelo seco

En la Ilustración 11 se observa como la diferencia de T_p se ha acentuado respecto a los dos casos anteriores, siendo en este caso su valor un 72% menor que la referencia histórica. En cuanto al Caudal punta los valores del Método SCS-CN y Green-Ampt son 16.15 m³/s y 168.41 m³/s respectivamente.

En la Ilustración 12 se observa los resultados comentados previamente sobre el T_p en relación con los tres episodios vistos: suelo húmedo, estándar y seco.

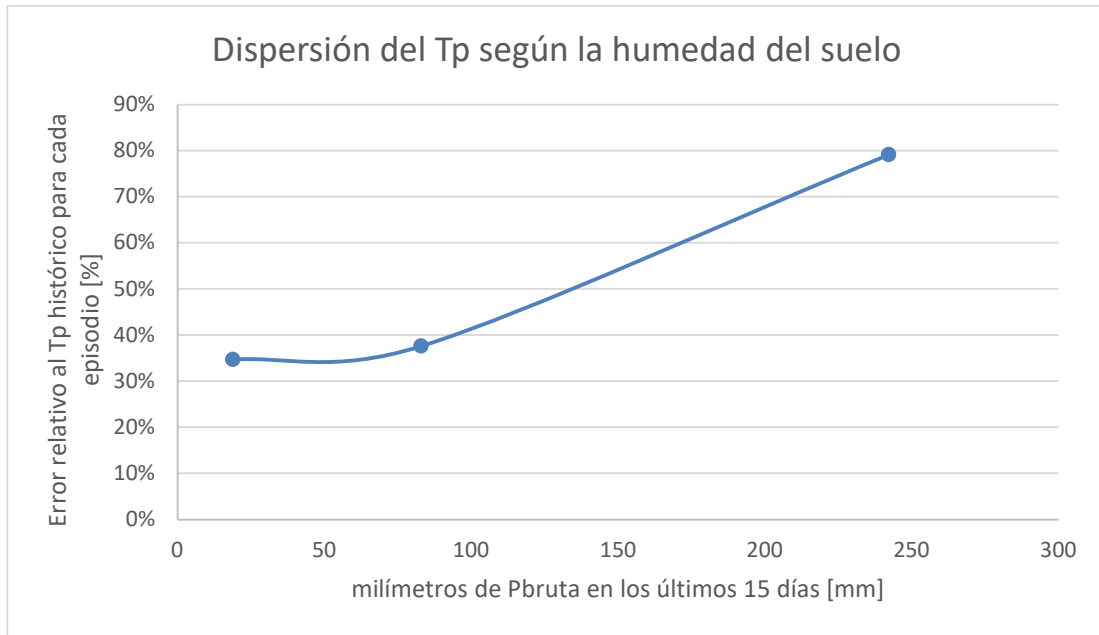


Ilustración 12. Dispersión del Tp en Green-Ampt según la humedad del suelo

Esta diferencia de Tp que se ha visto en la Ilustración 9, Ilustración 10 y Ilustración 11 se ve representada según la humedad del suelo descrita como los milímetros de Pbruta caída en los últimos 15 días en la Ilustración 12 donde cada punto del gráfico representa a los tres episodios tipo de suelo seco, estándar y húmedo empleados previamente.

5 BLOQUE II: METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

5.1 Introducción

Una vez se tienen calibrados los parámetros CN, Coef 1 y Coef 2 asociados al Caudal total (Qt), Caudal punta (Qp) y Tiempo pico (Tp), se procede con la metodología usada en este Trabajo que constará de varias alternativas (Green-Ampt/SCS-CN y Bloques Alternos/Método Alternativo) durante cada etapa para así poder sacar conclusiones acerca de cuál es más acertada en el caso del Caudal punta, Caudal total o Tiempo pico.

En primer lugar, se han recogido los máximos anuales de precipitación y caudal para generar un valor estadístico en 100 años de periodo de retorno. Se ha seleccionado este periodo de retorno para después hacer uso del mismo para el cambio climático, ya que es la información que existe. Una vez se tiene el valor que ofrece mayor confianza, se pasa a distribuir estos valores sobre dos hidrogramas: el modelo y el histórico.

Para llegar al hidrograma modelo se proponen tres formas de repartir los bloques de los hietogramas, según el Método de los Bloques Alternos, “Método de las 7am-7am” y el “Método Alternativo del percentil 80”.

Estos dos últimos métodos consisten en coger las mayores lluvias recogidas en el histórico del S.A.I.H. del Guadalquivir desde su percentil 80 y contando el inicio del episodio desde las 7:00 AM o una hora antes del inicio de la lluvia respectivamente.

Una vez se tienen varias opciones de hietogramas, se consideran dos formas de modelar sus pérdidas por infiltración, el Método de las Abstracciones o el Método de Green-Ampt. En este punto se tienen cuatro alternativas de hidrogramas que se compararán con el caudal de referencia o “Q-objetivo” tal y como se muestra en la Ilustración 13.

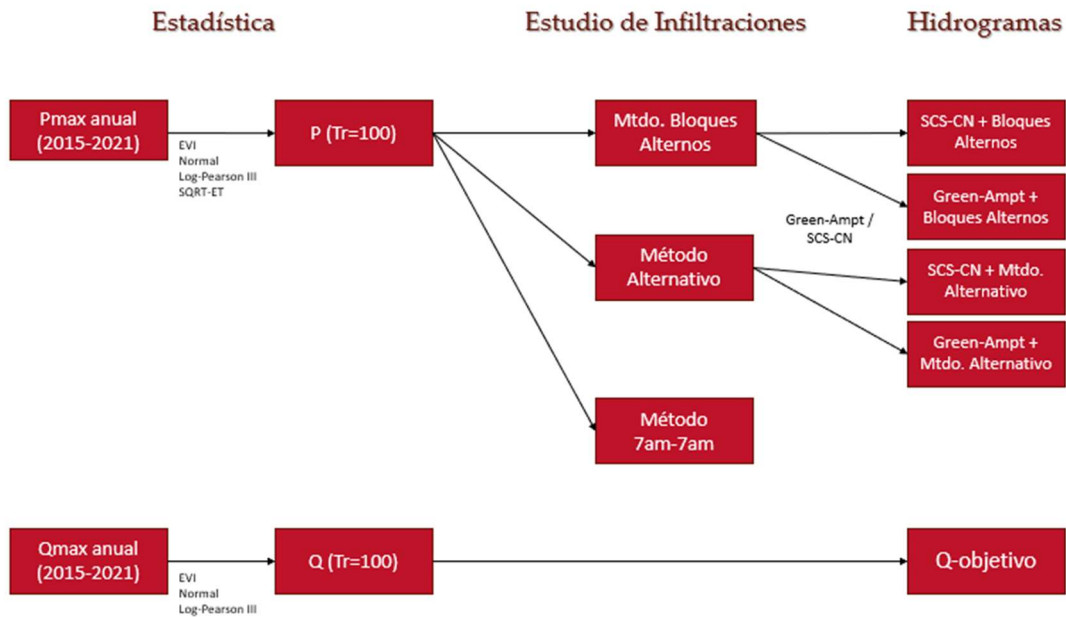


Ilustración 13. Diagrama empleado en la metodología del análisis de sensibilidad

Como se podrá ver más adelante, el Método Alternativo del percentil 80 es el que se acerca con mayor grado a los valores referencia de Caudal total (Q_t), Caudal punta (Q_p) y Tiempo pico (T_p) de modo que se usará una media ponderada de los caudales referidos a estos mismos episodios para generar un hidrograma tipo que represente el valor puntual del Caudal total con periodo de 100 años ($Q_t,100$).

Cabe destacar que, para el cálculo del $Q_t,100$ no se ha procedido a realizar la propagación hidráulica pese a tener un tamaño de la cuenca adecuado para hacerlo. Es por ello que se debe apuntar este estudio espacial sobre la zona de trabajo como una posible línea futura de investigación.

A continuación, se van a ver todas las partes que contienen este proceso más en detalle.

5.2 Estudio de precipitaciones

El estudio se encuentra en la primera fase del diagrama tal y como se muestra en la Ilustración 14. Para esta fase se han recogido los datos de la estación pluviométrica “A10_Anzur” colocada sobre el cauce del río Anzur desde 2015 para participar en un estudio estadístico (Anexo 5) sobre los siguientes modelos:

- Distribución de Weibull: Distribución de los datos
- Distribución Normal: Su uso se refiere a fenómenos de frecuencia media.
- Distribución EVI: Uso en lluvias extremas.
- Distribución Log-Pearson III: Episodios extremos y normales.
- Distribución SQRT-ET max: Episodios extremos.

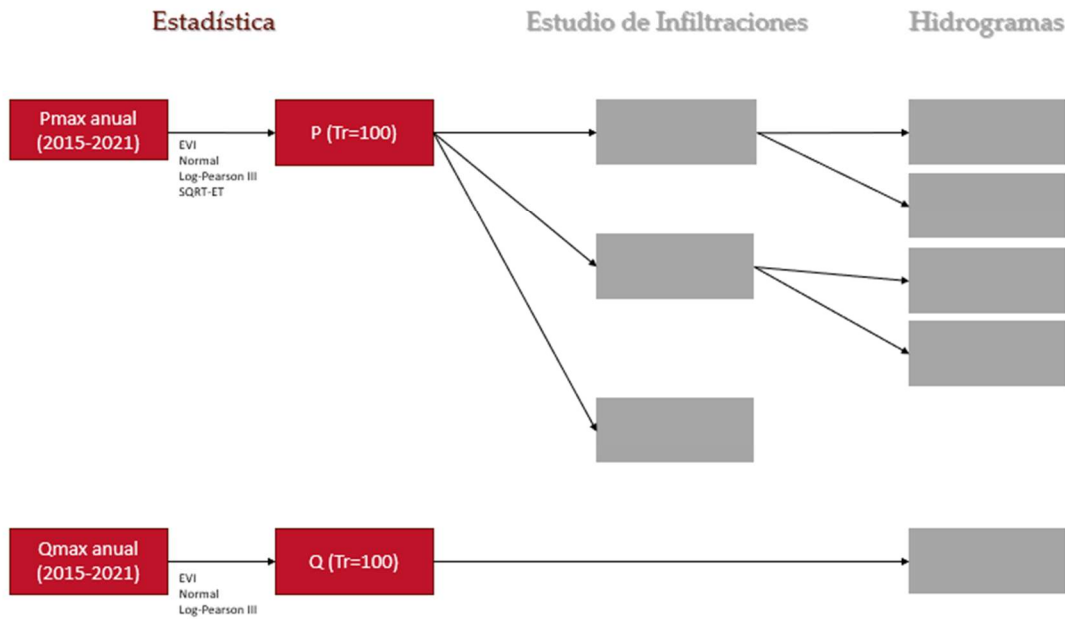


Ilustración 14. Primera fase del estudio: Funciones estadísticas de la precipitación.

Paralelamente se ha consultado el *Mapa de Máximas Lluvias Peninsulares (MMLLP a partir de ahora)* para tener una comparativa de estos modelos frente a la bibliografía ofrecida por el CEDEX. Los resultados de este documento para la estación meteorológica “A10_ANZUR” han sido las que se exponen en la Tabla 10.

MMLLP	P [MM]	CV	YI [TR=100]	PMED [MM]
A10_ANZUR	48	0.375	2.304	110.592

Tabla 10. Valores del Mapa de Máximas Lluvias Peninsulares para la estación pluviométrica A10_Anzur

Siendo P la precipitación máxima registrada en la zona de estudio, CV el coeficiente de variación, Pmed la precipitación media y el parámetro YI definido por la siguiente expresión.

$$YI = \frac{P}{Pmed}$$

A continuación, se han desarrollado los cálculos asociados a cada modelo de forma que ofrezcan una función de distribución F(xi) que pueda servir de comparación en el *Test de Kosmogolov*.

La dinámica que se ha seguido para escoger entre estos modelos es la siguiente:

1. Se halla la diferencia “D” entre la función de distribución $F(x_i)$ de mi función estadística y la de referencia.
2. Para cada función, escojo el máximo valor de D.
3. Hallo mi valor límite de aceptación para un intervalo de confianza del 5% ($\alpha=0.05$)
4. Comparo y descarto los valores de Dmax que superen dicho valor límite de aceptación.
5. Una vez tengo las funciones que han sido aceptadas, escojo entre ellas el valor máximo de precipitación para el periodo de retorno de 100 años.

El procedimiento es el que acaba de exponerse, sin embargo, la idea de que el MMLLP ofrezca un resultado **casi el doble respecto al valor medio** del resto de funciones estadísticas (183%) hace poner en duda esta fuente de información para este estudio.

Para hacer un estudio hidrológico debe de tenerse en cuenta siempre las condiciones del entorno, huyendo de la estandarización de la que se sirven muchas consultoras a la hora de elaborar sus proyectos. Por ello, en este caso se deben de poner en perspectiva la fuente citada anteriormente.

EL MMLLP es un resumen estadístico que se basa en el histórico de lluvias sobre el territorio español desde el siglo pasado. Pese a contar con un volumen de datos mucho mayor que el de la estación escogida del S.A.I.H. del Guadalquivir (2015-actualidad), los efectos climáticos acontecidos durante las últimas décadas hacen que estos datos se pongan en duda.

En este estudio se ven claramente como muestra una lluvia mucho mayor respecto a lo que se ha recogido en la última década, de modo que para este caso no se van a contar con la fuente del CEDEX y se siguen con los datos de las funciones estadísticas únicamente.

Por otro lado, dentro de las funciones estadísticas también se puede hacer un análisis de sensibilidad en las desviaciones de cada función o “Dmax”.

Como se ha comentado antes, el procedimiento estandarizado para escoger una función estadística involucra a los máximos puntuales de cada función. Sin embargo, no tiene en cuenta la desviación media o porcentual para cada caso.

Para el caso de la estación “A10_ANZUR” el método por defecto ofrecido por Dmax se corresponde con una buena aproximación frente a un estudio de errores más completos como podría ser la diferencias porcentuales frente al valor referencia o Dmed(%). Para el caso de este estudio se obtienen los siguientes valores de dichos parámetros en la Tabla 11.

	<i>Dmax</i>	<i>Dmed(%)</i>
<i>Normal</i>	0.19	0.22
<i>EVI</i>	0.25	0.37
<i>Log-Pearson III</i>	0.24	0.37

<i>SQRT</i>	0.31	0.57
-------------	------	------

Tabla 11. Valores de Dmax y Dmed porcentual para el estudio estadístico.

5.3 Hietogramas

Para el estudio de Hietogramas se van a comparar tres métodos, como se puede ver en la Ilustración 15, con los que poder construir tu distribución horaria de lluvias para un episodio tipo de proyecto: Método de Green-Ampt, Método de las Abstracciones o SCS-CN y Método de las 7am-7am.

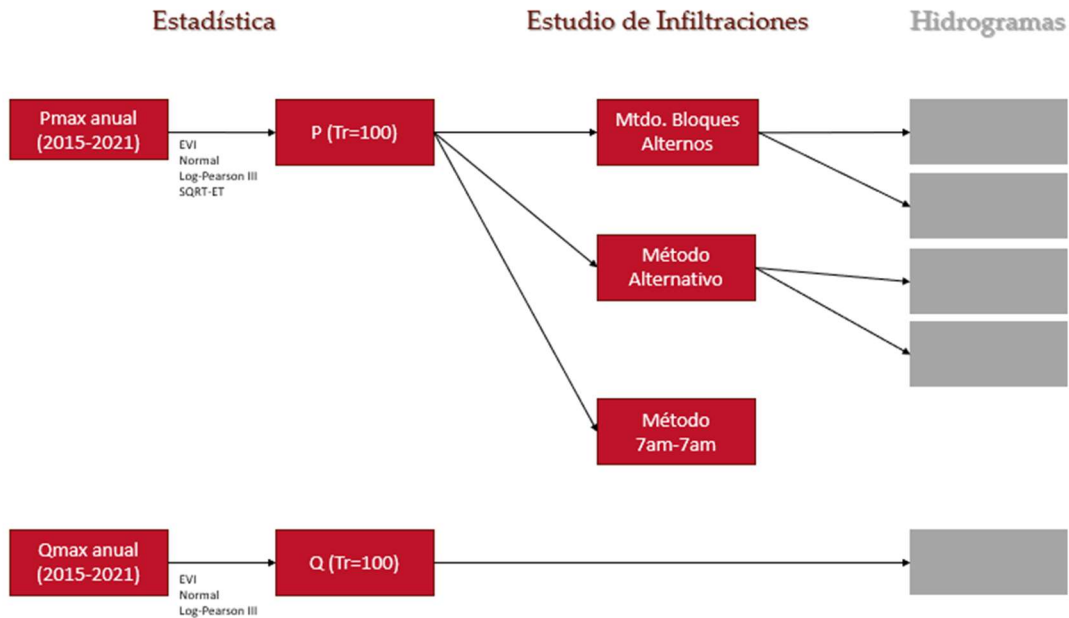


Ilustración 15. Diagrama de la metodología empleada en el estudio

Según esto, se puede tomar la precipitación estadística con periodo de retorno 100 años de la Tabla 25 (68.58 mm/día) para construir un hietograma por el método de los bloques alternos o bien se puede distribuir dichos bloques según el histórico real de lluvias de la zona. Esta comparativa servirá a su vez para analizar la coherencia del propio método de los bloques alternos.

5.3.1 Método de los bloques alternos

Para conocer el hietograma se deben de hallar previamente algunos datos necesarios para el cálculo de los bloques:

- Área de la cuenca: 335 km²
- Precipitación media estadística hallada en el anterior apartado. Pmed: 68.927 mm
- I1/I24: 9 [10]

De este modo, se puede calcular la intensidad de diseño y la curva IDF asociada al periodo de retorno ($T_r=100$ años) que proporcionaría un Histograma de diseño según se observa en la Ilustración 16.

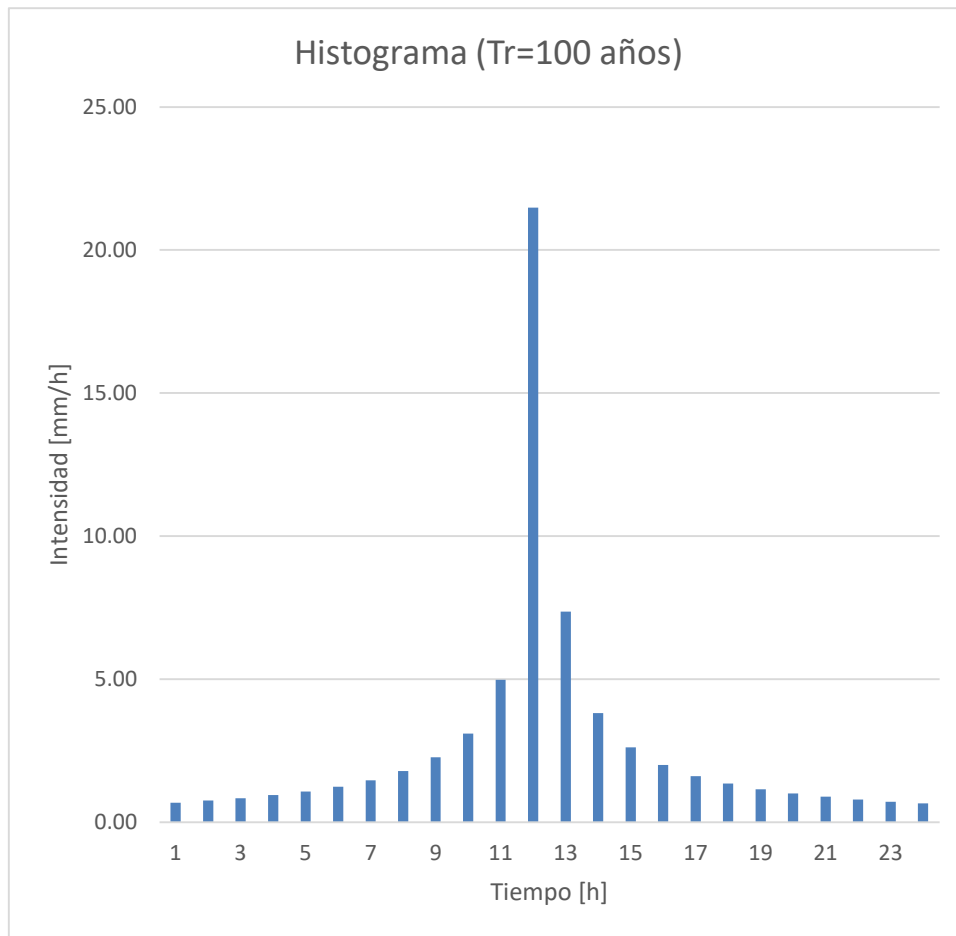


Ilustración 16. Hietograma de diseño según el Método de los Bloques Alternos

Nota: La tabla de abstracciones y volúmenes asociada a estos cálculos se encuentra en el Anexo 1 "Histograma de diseño".

Se observa que el bloque más grande se ha colocado a la izquierda basándonos en el registro histórico que se ha hecho de forma simultánea.

5.3.2 Método de las 7am-7am

Dado que este es el método del que se hace uso en algunas ocasiones, se ha decidido incluirlo entre las alternativas, sin embargo, las conclusiones respecto a este punto han sido claras, la arbitrariedad de empezar a contar cada episodio en base a una hora prefijada (7am) solo se ve justificada por la necesidad de una automatización en el proceso de extracción de datos de este estudio.

Para ver en qué grado de magnitud se ha perdido información de cada episodio se ha realizado en la Tabla 12 una pérdida porcentual de información en términos de precipitación bruta recogida por el Método de las 7am-7am frente al Método Alternativo (referencia: 0% información perdida de Pbruta).

<i>Fecha del Episodio</i>	<i>Pérdida del hietograma (%)</i>
1/11/2015	2%
18/10/17	39%
3/11/2017	15%
29/11/17	86%
25/11/20	39%

Tabla 12. Resumen de la pérdida de información del Método de las 7am-7am

Donde los episodios se refieren a los mismos eventos que los que se han tomado en el Método Alternativo para elaborar el hietograma de precipitación “más probable” de la Ilustración 17 y más en detalle sobre la Tabla 26.

5.3.3 Método Alternativo del percentil 80

Para considerar el reparto temporal real de un episodio de lluvias sobre la cuenca del río Anzur se ha procedido a estudiar todos los episodios de lluvias que se encuentran en el percentil 80 para tratar de modelar una “lluvia tipo”.

En base a el histórico recogido, se ha realizado una media de todos los episodios en concepto de función de probabilidad de lluvia para cada bloque horario y a su vez se ha extrapolado al valor de 100 años para crear el “episodio de lluvia más probable” en base a cómo se han desarrollado últimamente los de mayor magnitud.

Los resultados de la Tabla 26 muestran los valores que se han escogido para la metodología descrita en este apartado, así como el valor último del hidrograma “más probable” hallado a partir de una extrapolación respecto a la precipitación con periodo de retorno 100 años de esta zona de estudio (68.58 mm, Tabla 25).

En la Ilustración 17 se pueden observar los resultados de dicha extrapolación.

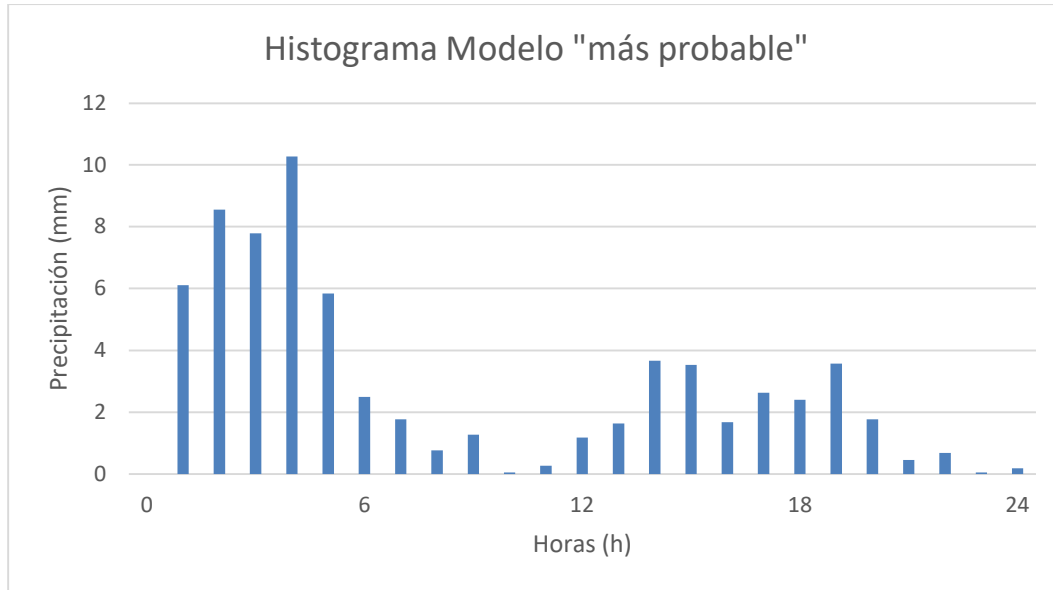


Ilustración 17. Hietograma para el Método Alternativo del percentil 80.

De entrada, se puede ver que el hietograma de los Bloques Alternos resulta mucho más desfavorable que el observado en el Método Alternativo ya que en términos de la relación entre el valor punta y el volumen total del episodio, el método de los Bloques Alternos alcanza un valor de 0.31 mientras que en el modelo es de 0.15, es decir **el valor punta es el doble en el método de los bloques alternos para el mismo volumen de lluvia caída.**

Esto puede entenderse como que el bloque horario de mayor intensidad “Pamx” representa el 33% del total de lluvia “Ptotal” en los Bloques Alternos mientras que, en el Método Alternativo, que es respaldado por el comportamiento real del histórico de precipitaciones de la zona, solo llega al 15% el bloque horario de mayor intensidad tal y como puede verse en la Tabla 13.

<i>Método empleado</i>	<i>Pmax/Ptotal</i>
<i>Bloques Alternos</i>	33%
<i>Método Alternativo</i>	15%

Tabla 13. Relación de Pmax/Ptotal para los dos Métods de hietogramas del estudio

Por otro lado, se han separado de este estudio las lluvias producidas en periodos de estiaje que cuentan con una duración especialmente corta (3-12h) para esta muestra. Este descarte se debe a que se ha considerado este fenómeno digno de un estudio diferenciado por sus posibles efectos sobre el terreno, llegando a valores parecidos de volumen descargado para tiempos hasta 6 veces menores que en periodos de invierno.

De este modo, podría abrirse otra línea de investigación para periodos de estiaje donde los efectos pueden ser notablemente distintos a los de este estudio debido a las condiciones climáticas y del suelo.

5.4 Estudio de infiltraciones

A continuación, se van a ver los dos métodos para trabajar con las infiltraciones en este estudio; Método de las Abstracciones y Método de Green-Ampt.

5.4.1 Método de las Abstracciones

En primer lugar, se ha calculado un CN medio de la cuenca tomando como punto de desagüe la estación de aforo *A10_ANZUR* facilitada por el SAIH del Guadalquivir. Para ello, se ha acudido al IGN para descargar un fichero MDT25 con el que se han hallado todas las trayectorias de gota que dan al punto de desagüe y que forman por tanto la cuenca.

Una vez obtenida la cuenca, se ha cruzado con la información de CN desagregado por zonas que ofrece el servicio REDIAM [11] para hallar una lista de valores del número de curva asociados a cada tramo dentro del dominio tal y como se ve en la Ilustración 18. Por último, se ha considerado hacer una media ponderada del CN para llegar al siguiente valor de estudio.

$$\text{CN medio}=81.3 \text{ mm}$$

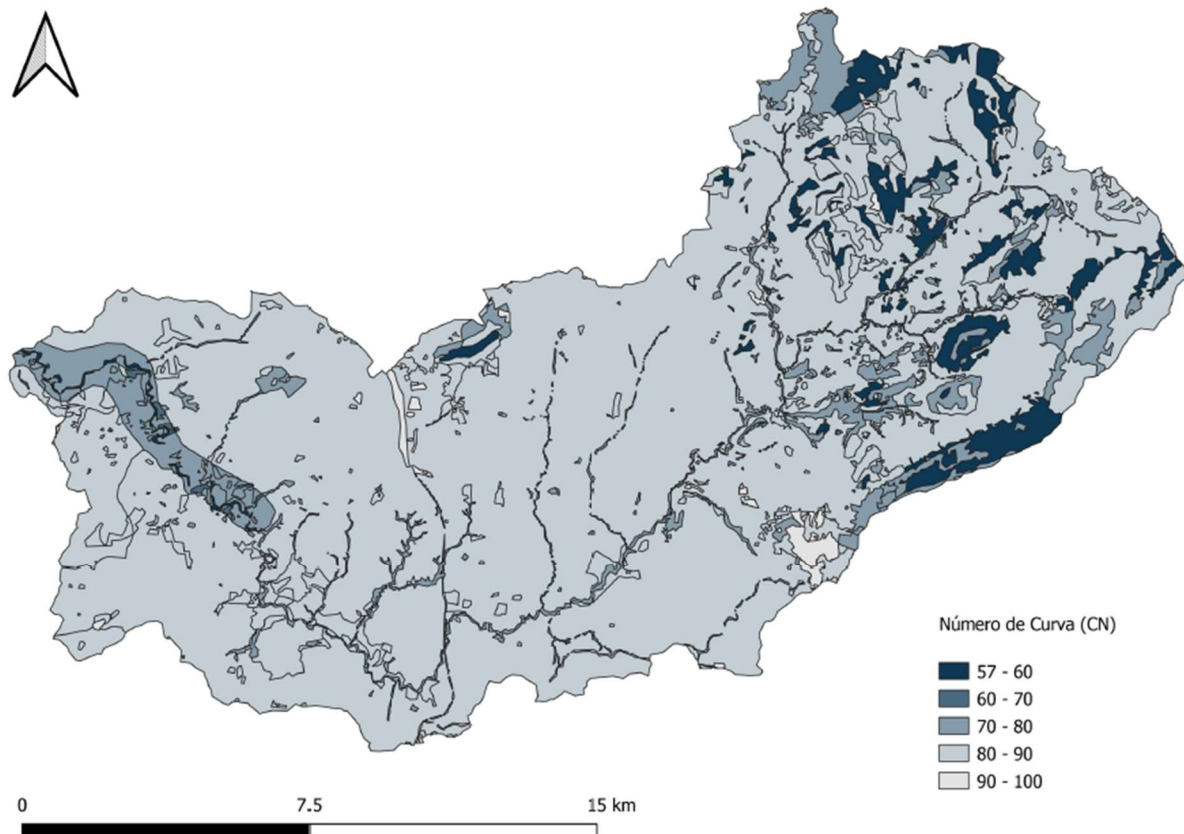


Ilustración 18. Mapa del CN desagregado en subtramos. Fuente: REDIAM [11]

Posteriormente se ha comparado este resultado con el CN calculado en el Bloque I y ha resultado encontrarse dentro del rango.

En segundo lugar, se ha desarrollado el método de las abstracciones para sacar los valores de precipitación efectiva, abstracción inicial y Fa del estudio para cada uno de los dos métodos vistos hasta ahora: El método de los bloques alternos y el método basado en el percentil80 del histórico de lluvias.

Nota: Los valores obtenidos en estos cálculos se encuentran en el Anexo 2.

Para ambos métodos, los hietogramas resultantes del método de las abstracciones se observan en la Ilustración 19 y la Ilustración 20.

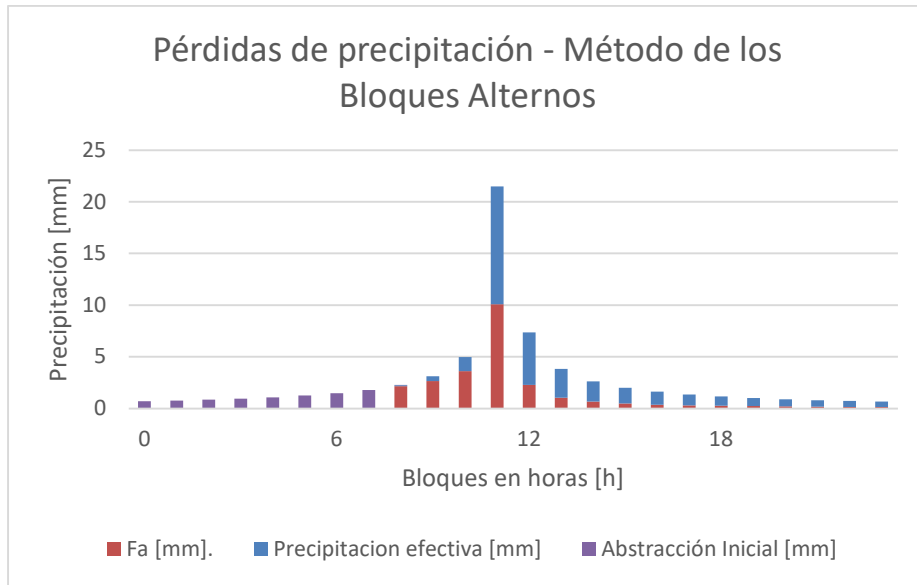


Ilustración 19. Resultado del método de las abstracciones para Bloques Alternos.

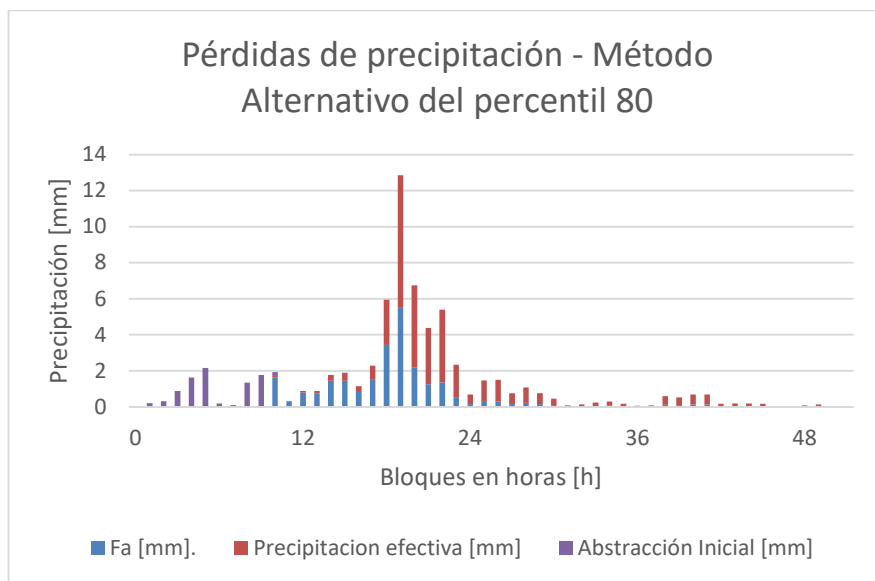


Ilustración 20. Resultado del Método de las Abstracciones para el percentil 80 del histórico.

Como puede observarse en la Ilustración 20, la colmatación del suelo se produce mucho antes en el caso del método alternativo propuesto, lo cual implica un periodo de escorrentía mucho mayor comparado con el Método de los Bloques Alternos. Esto trae consigo un **mayor riesgo por inundaciones ya que el suelo se encontrará saturado un 150% más de tiempo** donde pueden darse otras precipitaciones potenciales.

Otra desventaja del Método de los Bloques Alternos es que ha **infravalorado el valor total de las precipitaciones efectivas en un 10% respecto al Método Alternativo**. Esta diferencia puede no resultar tan grande a simple vista, sin embargo, una proyección infravalorada en un 10% sobre un estudio de llanura de inundación en un valle con relativa poca inclinación, puede significar la ocupación de varios metros por encima de lo previsto.

5.4.2 Método de Green-Ampt

Se han consultado los datos de la cuenca en la Carta Magna 50 [9] y aparecen *Arcillas y Margas arenosas* como principales componentes de la cuenca del río Anzur. Para ello, se ha realizado un estudio de sensibilidad previo tal y como se ha visto en el Título 3.1.2: *Calibración en el Método de Green-Ampt*.

Las ponderaciones no han sido del todo efectivas dada la notable diferencia de permeabilidades en ambos casos. Por otro lado, el uso de una deducción inversa como se trató de hacer en el Bloque I no ha sido posible y por tanto no se cuenta tampoco con una referencia de permeabilidades en la cuenca sobre el histórico de lluvias.

A estos inconvenientes dados por la permeabilidad como factor definitivo del suelo en el método, se le suma la inadecuada discriminación de encharcamiento/no encharcamiento que hace el Método de Green-Ampt en el hietograma como se detalla en el Anexo 4. Esto se debe a que el valor de infiltración límite que es definido no se ve superado muchas veces por la intensidad de lluvia en cada bloque horario y por tanto no devuelve valor alguno de escorrentía en esta celda.

Estas celdas horarias del hietograma se alejan por tanto de la realidad ya que siempre existirá una escorrentía porcentual frente a una lluvia caída, aunque esta sea pequeña. De esta forma, las duraciones también se ven reducidas modificando a su vez el Tiempo pico (T_p).

Debido a estos motivos, se ha descartado el Método de Green-Ampt como alternativa para tener en cuenta las pérdidas de precipitación para el caso de estudio del río Anzur.

5.5 Hidrogramas

Por último, se ha desarrollado el cálculo de hidrogramas para todo el árbol de decisiones que se han hecho durante este estudio tal y como se ve en la Ilustración 21. De esta forma, quedan las siguientes posibilidades:

- Método de las Abstracciones o SCS-CN
 - Según el Método de los Bloques Alternos **(1)**
 - Según el Método Alternativo del percentil 80 **(2)**
- Método de Green-Ampt
 - Según el Método de los Bloques Alternos **(3)**
 - Según el Método Alternativo del percentil 80 **(4)**
- Histórico real de hidrogramas en la cuenca **(Q-objetivo)**

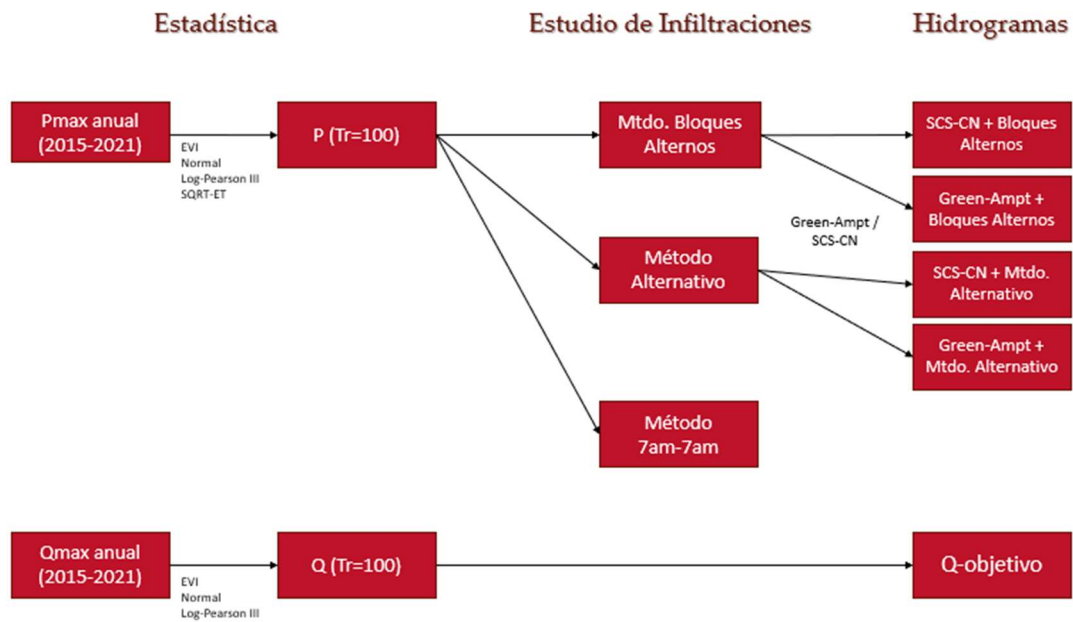


Ilustración 21. Diagrama de la metodología empleada en el estudio

Para realizar el cálculo sobre todos ellos, se ha elegido el método SCS para caracterizar la evolución del caudal sobre el punto de desagüe que se ha detallado en el Anexo 3. Así, cada uno de ellos encuentra unos valores de Caudal punta (Q_p), Caudal total (Q_t) y Tiempo pico (T_p) respectivamente en cada una de las cuatro combinaciones lineales que han surgido de los distintos métodos.

Los hidrogramas resultantes de cada uno de estos métodos se observan en la Ilustración 22.

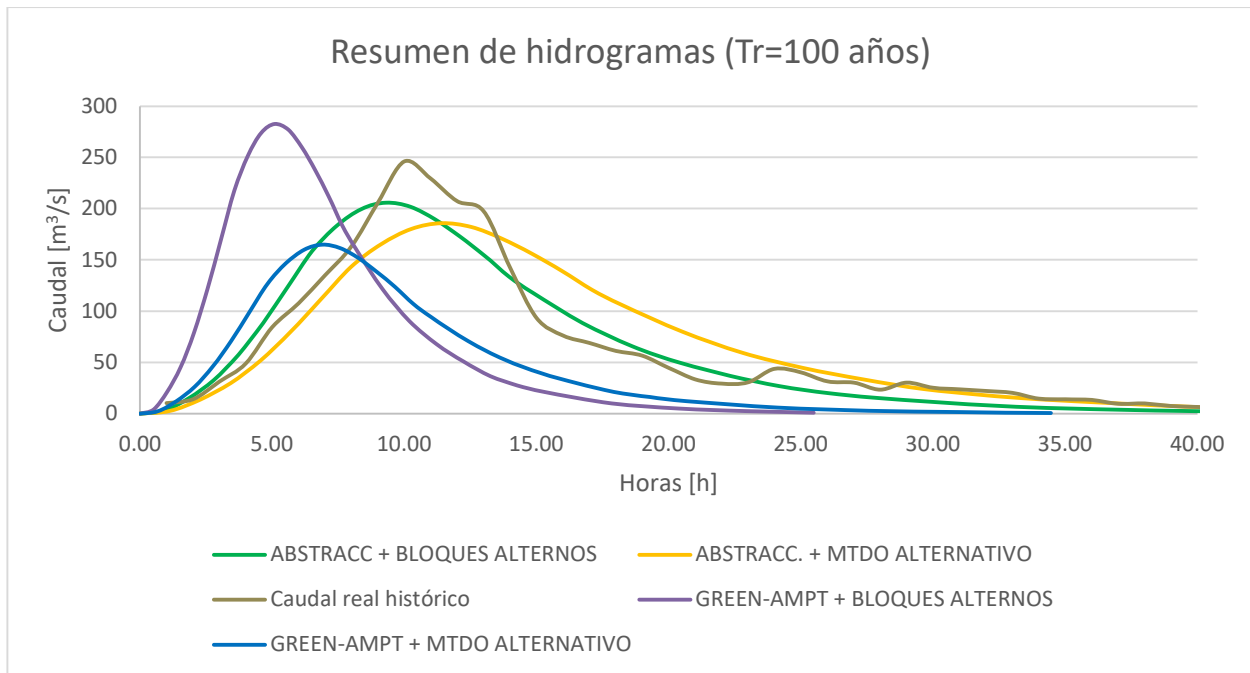


Ilustración 22. Resumen de hidrogramas obtenidos respecto al valor de referencia (gris)

En la Ilustración 22, los valores del Caudal punta son sensiblemente superiores en el caso de los hidrogramas asociados al Método de Green-Ampt, con errores relativos a la referencia de +14.84% y -32.98% en los Bloques Alternos y Método Alternativo respectivamente, frente al Método de las Abstracciones, con errores relativos de -16.30% y -13.89% en los Bloques Alternos y Método Alternativo.

Asimismo, para el caso del Caudal total y Tiempo pico, los errores del Método SCS-CN no superan el 10% mientras que en las metodologías que usan el Método de Green-Ampt llegan al 49.02% de error relativo a la referencia histórica. Dicho error relativo en los valores del Tiempo pico para el Método de Green-Ampt encuentran una justificación en la dispersión de los resultados de Precipitación efectiva (Pe) tal y como se ha detallado en el apartado 5.4.2.

Será por tanto, motivo de interés el uso del Método SCS-CN para soluciones dedicadas a límites de inundación u otras obras civiles que cuenten con los parámetros de Q_t y T_p , mientras que para el caso de construcciones que solo cuenten con el Q_p será justificable el uso de ambos métodos de infiltración.

6 PREVISIÓN CLIMÁTICA A 100 AÑOS: CORRECCIÓN DE LOS RESULTADOS EN BASE A LAS PROYECCIONES.

Para acercar los resultados que se han obtenido a un escenario más realista se ha acudido a dos fuentes: El CEDEX (Centro De Estudios Y Experimentación De Obras Públicas) [1] y la AEMET (Agencia Estatal De Meteorología). [2]

La adición de estos estudios resulta fundamental para conocer las implicaciones reales que tienen nuestros resultados para el escenario que se ha proyectado, es decir, 100 años. Pese a que existen numerosos escenarios con los que puede encontrarse la zona en este periodo de tiempo, las proyecciones realizadas por las dos fuentes de la AEMET y el CEDEX abordan un escenario de precipitación relativamente concreto.

En sus dos estudios realizados para proyectar las precipitaciones, se han encontrado una variación del -18% al -23% respecto a los valores actuales sobre la cuenca del Guadalquivir para el 2070-2100. La existencia de un rango de valores se debe a que se plantean varios escenarios entendidos como más o menos desfavorables según el caso.

El objetivo con este estudio es ver la implicación que estas proyecciones tienen sobre los resultados del Caudal punta, Caudal total y Tiempo pico. Para ello, se muestran en la Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 algunos datos ilustrativos para el escenario que nos ocupa.

En la Tabla 14, se muestran los valores del error porcentual frente al histórico para los valores actualizados de precipitación según se ha comentado previamente. En términos del Caudal punta, el Método de Green-Ampt+Bloques Alternos se ajusta de la forma más fidedigna a la referencia de caudales disponible con un -26.15% de error porcentual. En el caso del Caudal total y Tiempo pico, los resultados de las metodologías asociadas al Método de las Abstracciones son más ajustados con la realidad (-0.36 al -7.31% en términos del Tiempo pico y -31.12% al -38.63% en Caudal total) que en el caso del Método de Green-Ampt (errores porcentuales superiores al 40% en las metodologías asociadas).

Método usado	(%) error porcentual frente al histórico		
	Qpunta	Qtotal	Tpico

<i>Abstracciones + Bloques Alternos</i>	-43.02%	-38.63%	-7.31%
<i>Abstracciones + Método Alternativo</i>	-40.51%	-31.12%	-0.36%
<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	-26.15%	-62.04%	-55.77%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	-74.93%	-84.37%	-46.36%

Tabla 14. Resumen de los valores Qp, Qt, Tp actualizados para la acción climática prevista.

Si se ordenan estos resultados en términos de variación respecto al escenario anterior, quedan los valores descritos por la Tabla 15, Tabla 16 y la Tabla 17.

Método usado	Qpunta	
<i>Abstracciones + Bloques Alternos</i>	0%	11%
<i>Abstracciones + Método Alternativo</i>	-11%	
<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	0%	0%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	0%	

Tabla 15 Diferencia de variación de Qp en cada una de las metodologías empleadas.

Método usado	Qtotal	
<i>Abstracciones + Bloques Alternos</i>	0%	0%
<i>Abstracciones + Método Alternativo</i>	0%	
<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	0%	0%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	0%	

Tabla 16. Diferencia de variación de Qtotal en cada una de las metodologías empleadas.

Método usado	Tpico	
<i>Abstracciones + Bloques Alternos</i>	0%	-14%
<i>Abstracciones + Método Alternativo</i>	14%	

<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	0%	0%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	0%	

Tabla 17. Diferencia de variación de Tp en cada una de las metodologías empleadas.

Como puede observarse, el comportamiento del Método de las Abstracciones **no muestra divergencias en el descenso de sus resultados** debido a una precipitación de entrada menor según se han visto en el apartado anterior. Por el contrario, el Método de Green-Ampt presenta una divergencia de **hasta el 9%** entre ambos métodos empleados para la infiltración del suelo.

Podría considerarse la opción de emplear el Método de Green-Ampt para obras civiles que requieran únicamente del Caudal punta, sin embargo, estos mismos resultados, aunque se hayan visto poco afectados con el factor climático ya traían un valor poco adecuado a la realidad como se vió en los apartados anteriores.

7 RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Como se ha descrito antes, el objetivo del Trabajo ha sido recoger los valores del Caudal punta, Caudal total y Tiempo pico para varios métodos usados en el campo de la hidrología. A continuación, se va a ver un resumen de ellos y a conocer el uso para el que se encuentran mejor orientados.

En la Ilustración 23 se encuentra la línea de investigación seguida junto con la rama de estudio final escogida a la luz de los resultados obtenidos.

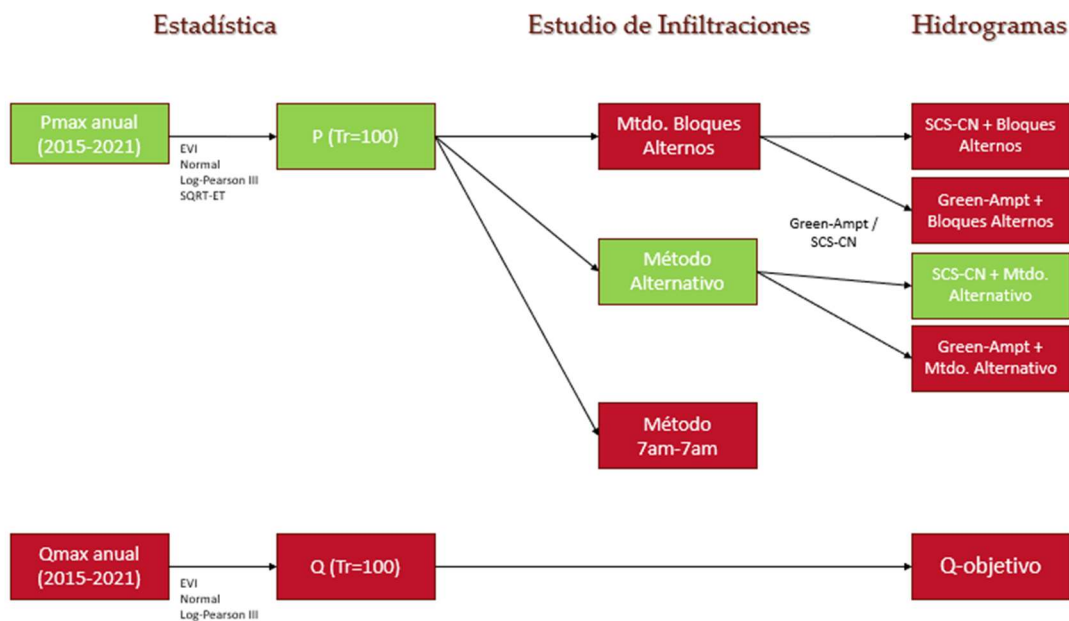


Ilustración 23. Resumen de las metodologías y opción óptima para el caso de estudio.

Una vez descrito el camino óptimo, se va a comparar dicha solución con el resto de las alternativas de forma cuantitativa.

Método usado	(%) error porcentual frente al histórico		
	Qpunta	Qtotal	Tpico
<i>Abstracciones + Bloques Alternos</i>	-16.30%	-9.53%	-6.97%

<i>Abstracciones + Método Alternativo</i>	-13.89%	0.03%	-0.02%
<i>Green-Ampt + Bloques Alternos</i>	14.84%	-31.98%	-49.02%
<i>Green-Ampt + Método Alternativo</i>	-32.98%	-46.34%	-31.09%

Tabla 18. Resumen de los valores Qp, Qt, Tp para cada una de las metodologías empleadas.

Como se puede observar en la Tabla 18, el caso de Green-Ampt es el más desfavorable en todos los escenarios donde el error porcentual se encuentra entre el 14.84% y el -49.02%. Es por ello por lo que se ha descartado previamente como modelo hidrológico para el cálculo de infiltraciones. Del mismo modo puede verse como las duraciones son drásticamente menores que en los otros dos casos debido a la dinámica que sigue para descartar horas de poca lluvia en términos de escorrentía.

En cuanto a la comparativa entre Bloques Alternos y el Método Alternativo, dentro del Método de las Abstracciones, la cuestión no está tan clara. Bien es cierto que el Método Alternativo genera mejores resultados (-13.89% , 0.03% y -0.02%) para el cálculo del hidrograma, pero a cambio exige un, aunque breve, paso añadido al estudio hidrológico.

Se podría discutir que, para casos de canales y drenajes transversales o longitudinales, el caso del Método Alternativo podría quedar descartado sin mayor trascendencia ya que el error diferencial entre ambos casos para el Qpunta es apenas de un 2.41%. Sin embargo, si se habla de estudios de Zonas de Flujo Preferente, Llanuras de inundación, Zonas de Servidumbre o Mapas de peligrosidad donde es usado cada uno de los tres factores, entonces se debería de considerar la opción del Método Alternativo.

ANEXO 1: HISTOGRAMA DE DISEÑO

Dado que las fuentes del proyecto reciben un diferencial de tiempo de 1 hora, se ha decidido ser coherentes con esta cifra para el cálculo del histograma que se presenta a continuación.

<i>Tiempo [h]</i>	Fa [mm]	It,d [mm/h]	Vol acum [mm]	Vol incr [mm]	Histograma diseño [mm]
1	9.00	21.50	21.50	21.50	0.65
2	6.04	14.43	28.85	7.36	0.72
3	4.72	11.28	33.83	4.97	0.79
4	3.94	9.41	37.64	3.81	0.89
5	3.41	8.15	40.74	3.10	1.00
6	3.03	7.23	43.35	2.62	1.15
7	2.73	6.52	45.62	2.26	1.34
8	2.49	5.95	47.61	1.99	1.61
9	2.30	5.49	49.39	1.78	1.99
10	2.14	5.10	51.00	1.61	2.26
11	2.00	4.77	52.47	1.47	2.62
12	1.88	4.48	53.81	1.34	3.81
13	1.77	4.23	55.05	1.24	7.36
14	1.68	4.01	56.20	1.15	21.50
15	1.60	3.82	57.28	1.07	4.97
16	1.53	3.64	58.28	1.00	3.10
17	1.46	3.48	59.22	0.94	2.26
18	1.40	3.34	60.11	0.89	1.78
19	1.34	3.21	60.95	0.84	1.47
20	1.29	3.09	61.74	0.79	1.24

21	1.25	2.98	62.50	0.75	1.07
22	1.20	2.87	63.21	0.72	0.94
23	1.16	2.78	63.89	0.68	0.84
24	1.13	2.69	64.54	0.65	0.75

Tabla 19. Histograma de diseño

ANEXO 2: PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN

Partiendo de las precipitaciones de los bloques alternos:

<i>Tie mp o (h)</i>	<i>Precip. inremen t [mm]</i>	<i>Precip. acum [mm]</i>	<i>Precip. Efect. incrementada [mm]</i>	<i>Precip. efectiva acumulada [mm]</i>	<i>Fa acum [mm]</i>	<i>Fa inremen tada [mm]</i>	<i>la inremen tada [mm]</i>
1	0.69	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
2	0.76	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76
3	0.84	2.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84
4	0.95	3.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95
5	1.08	4.31	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08
6	1.25	5.55	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25
7	1.47	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47
8	1.79	8.81	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79
9	2.27	11.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.27
10	3.11	14.20	0.10	0.10	2.414	2.414	0.59
11	5.00	19.20	0.75	0.86	6.658	4.244	0.00
12	21.59	40.79	8.82	9.68	19.425	12.767	0.00
13	7.39	48.18	4.35	14.03	22.461	3.036	0.00
14	3.83	52.00	2.43	16.47	23.854	1.393	0.00
15	2.63	54.63	1.73	18.20	24.750	0.896	0.00
16	2.00	56.63	1.35	19.55	25.402	0.652	0.00
17	1.62	58.25	1.11	20.66	25.910	0.508	0.00
18	1.35	59.60	0.94	21.59	26.323	0.413	0.00
19	1.16	60.75	0.81	22.40	26.668	0.345	0.00
20	1.01	61.76	0.71	23.12	26.963	0.295	0.00
21	0.89	62.65	0.64	23.75	27.220	0.256	0.00
22	0.80	63.45	0.57	24.32	27.445	0.226	0.00
23	0.72	64.17	0.52	24.84	27.646	0.201	0.00

24	0.65	64.82	0.47	25.32	27.826	0.180	0.00
----	------	-------	------	-------	--------	-------	------

Tabla 20. Pérdidas de precipitación según el Método de los Bloques Alternos.

Partiendo de las precipitaciones del método alternativo propuesto:

<i>Tie mp o (h)</i>	<i>Precip. inremen t [mm]</i>	<i>Precip. acum [mm]</i>	<i>Precip. efect incrementad a [mm]</i>	<i>Precip. efectiva acumulada [mm]</i>	<i>Fa acum [mm]</i>	<i>Fa inremen tada [mm]</i>	<i>la inremen tada [mm]</i>
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	6.14	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	6.14
3	8.60	14.74	0.15	0.15	2.91	2.91	5.54
4	7.83	22.57	1.56	1.71	9.17	6.27	0.00
5	10.33	32.89	3.94	5.65	15.56	6.39	0.00
6	5.87	38.76	2.93	8.58	18.50	2.94	0.00
7	2.50	41.27	1.37	9.95	19.64	1.13	0.00
8	1.77	43.04	1.01	10.95	20.40	0.77	0.00
9	0.77	43.81	0.45	11.40	20.73	0.32	0.00
10	1.27	45.09	0.75	12.15	21.251	0.523	0.00
11	0.05	45.13	0.03	12.18	21.270	0.018	0.00
12	0.27	45.41	0.16	12.34	21.380	0.110	0.00
13	1.18	46.59	0.71	13.06	21.849	0.469	0.00
14	1.64	48.23	1.01	14.06	22.480	0.631	0.00
15	3.69	51.91	2.34	16.41	23.822	1.342	0.00
16	3.55	55.46	2.35	18.75	25.024	1.201	0.00
17	1.68	57.14	1.14	19.90	25.565	0.541	0.00
18	2.64	59.78	1.82	21.72	26.378	0.814	0.00
19	2.41	62.19	1.70	23.42	27.088	0.709	0.00
20	3.59	65.79	2.59	26.02	28.088	1.001	0.00
21	1.77	67.56	1.30	27.32	28.559	0.471	0.00
22	0.45	68.02	0.34	27.66	28.677	0.118	0.00
23	0.68	68.70	0.51	28.16	28.853	0.176	0.00

24	0.05	68.74	0.03	28.20	28.865	0.012	0.00
----	------	-------	------	-------	--------	-------	------

Tabla 21. Pérdidas de precipitación según el Método Alternativo

ANEXO 3: TABLA DE VALORES DEL MÉTODO SCS PARA HIDROGRAMAS.

Se presenta la tabla de valores necesaria para elaborar un hidrograma con el Método SCS. El valor de cada celda es multiplicado por el Tiempo pico (T_p) y el Caudal punta (Q_p) para poder sacar la distribución descrita por el hidrograma en el episodio.

t/T_p	Q/Q_p
0	0
0.1	0.015
0.2	0.075
0.3	0.16
0.4	0.28
0.5	0.43
0.6	0.6
0.7	0.77
0.8	0.89
0.9	0.97
1	1
1.1	0.98
1.2	0.92
1.3	0.84
1.4	0.75
1.5	0.65
1.6	0.57
1.8	0.43
2	0.32
2.2	0.24
2.4	0.18
2.6	0.13
2.8	0.098
3	0.075
3.5	0.036
4	0.018
4.5	0.009
5	0.004

Tabla 22. Diagrama de valores para el Método SCS

ANEXO 4: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE GREEN-AMPT.

Para calibrar las condiciones del suelo de modo que tuviesen un resultado coherente con los datos históricos de caudal se ha optado por balancear el peso de ponderación entre los dos tipos de suelo caracterizados en la cuenca: Arcillas Arenosas y Margas Arcillosas.

Pese a que los resultados del Magna 50 [9] reflejaban una presencia mayor de Margas Arcillosas, se ha tratado de ponderar hacia las Arcillas Arenosas en un intento de converger los resultados con la realidad de caudales históricos. Pese a ello, la diferencia con estos resultados ha sido evidente tanto en términos de Q_t como en la duración de la lluvia y por tanto de T_p .

Tiempo (h)	95% de Arcillas Arenosas		90% de Arcillas Arenosas		80% Arcillas Arenosas	
	Bloques Alternos	SCS-CN	Bloques Alternos	SCS-CN	Bloques Alternos	SCS-CN
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	1	0	0
5	0	1	0	1	0	0
6	0	1	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0
12	1	0	1	0	1	0
13	1	0	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0
15	0	1	0	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0

24	0	0	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---	---

Tabla 23. Resultados de escorrentía (1) frente a la infiltración total (0).

Como puede observarse en la Tabla 23, los tramos horarios donde se encuentran valores de escorrentía (Pe) se reducen drásticamente en cuanto el porcentaje de Arcillas Arenosas empieza a combinarse con las Margas Arcillosas también presentes en la zona de estudio.

ANEXO 5: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS ESTADÍSTICOS DEL ESTUDIO.

Tras haber realizado la proyección estadística a 100 años para cada uno de los métodos que se han comentado en el Título 5, cada uno de ellos ofrece un error de la función estadística que se resume en la Tabla 24.

Orden	$P [mm]$	$F_o (xi)$	z_i	$F (xi)$	D	$F(xi)$	D	y	φ	z_{pi}	$F (xi)$	D	$F (xi)$	D
1	50.40	0.86	1.99	0.98	0.12	0.91	0.05	1.70	11.87	1.70	0.96	0.10	0.97	0.11
2	37.80	0.71	0.37	0.65	0.07	0.65	0.06	1.58	8.25	0.55	0.71	0.00	0.78	0.06
3	33.80	0.57	-0.14	0.44	0.13	0.50	0.07	1.53	6.84	0.04	0.52	0.06	0.61	0.04
4	32.00	0.43	-0.37	0.36	0.07	0.42	0.01	1.51	6.15	-0.23	0.41	0.02	0.50	0.07
5	31.90	0.29	-0.38	0.35	0.07	0.42	0.13	1.50	6.11	-0.25	0.40	0.12	0.50	0.21
6	31.10	0.14	-0.49	0.31	0.17	0.38	0.24	1.49	5.79	-0.38	0.35	0.21	0.44	0.30
7	25.00	0.00	-1.27	0.10	0.10	0.13	0.13	1.40	3.04	-1.71	0.04	0.04	0.07	0.07
	<i>Test Kosmogolov</i>				<i>Normal</i>			<i>EVI</i>		<i>Log- Pearson III</i>			<i>SQRT- max</i>	

Tabla 24. Resultados de las funciones de distribución para cada función estadística.

De forma alternativa, se pueden distribuir gráficamente los resultados de la Tabla 24 en la Ilustración 24 donde se representan los errores de cada función de distribución frente al valor de referencia de Kosmogolov.

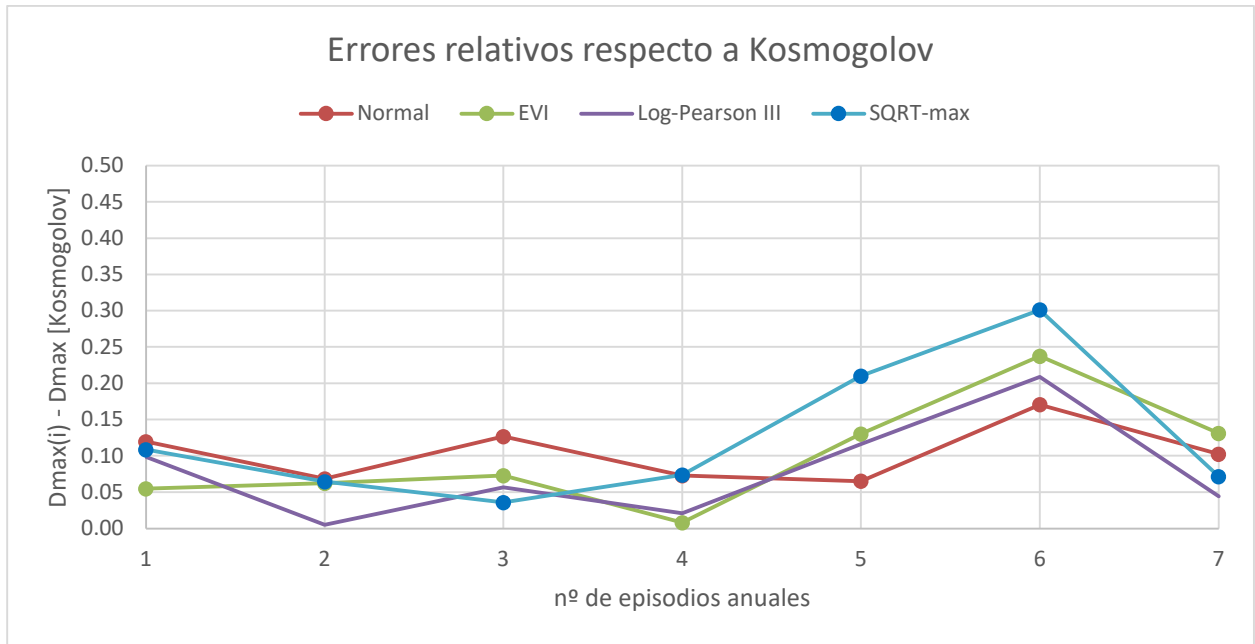


Ilustración 24. Errores relativos a la función de Kosmogolov para cada función estadística

De la Tabla 24 se obtiene a su vez un resumen comparativo donde se muestran los máximos o “Dmax” asociados a cada función estadística que han debido de cumplir previamente con la condición de no superar el valor ofrecido por la siguiente expresión para un grado de incertidumbre del 5%. El resumen comparativo se muestra en la Tabla 25.

$$Dmax < \frac{1.36}{\sqrt{n}}$$

Siendo “n” el número de años que se han incluido en el estudio estadístico.

<i>Tr=100 años</i>	<i>Normal</i>	<i>EVI</i>	<i>Log-Pearson</i>	<i>SQRT-max</i>	<i>MMLLP</i>
<i>Estación 1</i>	53.02	68.58	62.54	59.00	110.59
<i>¿Acepta?</i>	Se acepta	Se acepta	Se acepta	Se acepta	
<i>Dmax</i>	0.17	0.24	0.21	0.30	

Tabla 25. Resumen comparativo de las diferentes funciones estadísticas.

En el caso de este estudio, el máximo valor de precipitación asociado al periodo de retorno de 100 años es de 68.58 mm (función de EVI) ya que el resultado aportado por el Mapa de Máximas Lluvias Peninsulares (MMLLP) no se ha considerado válido por los motivos expuestos previamente en el Título 5.

ANEXO 6: EPISODIOS DE PRECIPITACIÓN USADOS EN EL MÉTODO ALTERNATIVO DEL PERCENTIL 80

En este Anexo se muestra sobre la Tabla 26 los valores de precipitación para todos los episodios que sumaban una Pbruta por encima del percentil 80 de la zona de estudio. A estos episodios se les ha realizado una media que posteriormente se ha extrapolado al valor estadístico de la Tabla 25 (68.58 mm) para modelar el hidrograma de precipitación “más probable” de la Ilustración 17.

<i>EPISODIOS POR ENCIMA DEL PERCENTIL 80</i>											<i>MEDIA PONDERADA AL P(Tr=100)</i>	
<i>Ptotal</i>	39.2	34.7	31.8	50.4	34.7	21.64						68.58
	01/11/15- 20:00	4.3	18/10/17- 03:00	1.4	03/11/17- 15:00	7.5	29/11/17- 00:00	1.5	25/11/20- 15:00	0.3	1.93	6.11
	01/11/15- 21:00	12.4	18/10/17- 04:00	5.9	03/11/17- 16:00	0.6	29/11/17- 01:00	1.3	25/11/20- 16:00	0	2.70	8.56
	01/11/15- 22:00	8.2	18/10/17- 05:00	4.6	03/11/17- 17:00	0.7	29/11/17- 02:00	3.5	25/11/20- 17:00	3.7	2.46	7.79
	01/11/15- 23:00	8.2	18/10/17- 06:00	3.5	03/11/17- 18:00	3	29/11/17- 03:00	16	25/11/20- 18:00	8	3.24	10.28
	02/11/15- 00:00	4.9	18/10/17- 07:00	3.1	03/11/17- 19:00	4.4	29/11/17- 04:00	10.7	25/11/20- 19:00	0.5	1.84	5.84
	02/11/15- 01:00	0.1	18/10/17- 08:00	4.8	03/11/17- 20:00	0.5	29/11/17- 05:00	6.3	25/11/20- 20:00	0.1	0.79	2.49
	02/11/15- 02:00	0.1	18/10/17- 09:00	3.8	03/11/17- 21:00	0	29/11/17- 06:00	3.8	25/11/20- 21:00	0	0.56	1.77
	02/11/15- 03:00	0	18/10/17- 10:00	1.1	03/11/17- 22:00	0	29/11/17- 07:00	0.8	25/11/20- 22:00	0.6	0.24	0.77
	02/11/15- 04:00	0.1	18/10/17- 11:00	2.5	03/11/17- 23:00	0	29/11/17- 08:00	0.3	25/11/20- 23:00	0.2	0.40	1.27
<i>Horas</i>	02/11/15- 05:00	0	18/10/17- 12:00	0.1	04/11/17- 00:00	0	29/11/17- 09:00	0	26/11/20- 00:00	0	0.01	0.05
	02/11/15- 06:00	0	18/10/17- 13:00	0.6	04/11/17- 01:00	0	29/11/17- 10:00	0.1	26/11/20- 01:00	0	0.09	0.27
	02/11/15- 07:00	0	18/10/17- 14:00	0.1	04/11/17- 02:00	0	29/11/17- 11:00	0.1	26/11/20- 02:00	2.5	0.37	1.18
	02/11/15- 08:00	0.1	18/10/17- 23:00	0.1	04/11/17- 03:00	0	29/11/17- 12:00	0.4	26/11/20- 03:00	3.4	0.51	1.63
	02/11/15- 09:00	0	19/10/17- 00:00	1.1	04/11/17- 04:00	3.2	29/11/17- 13:00	4.4	26/11/20- 04:00	3.8	1.16	3.67
	02/11/15- 10:00	0	19/10/17- 01:00	0.8	04/11/17- 05:00	3.5	29/11/17- 14:00	0.8	26/11/20- 05:00	3.5	1.11	3.53
	02/11/15- 11:00	0	19/10/17- 02:00	0.4	04/11/17- 06:00	1.7	29/11/17- 15:00	0.4	26/11/20- 06:00	1.6	0.53	1.67
	02/11/15- 12:00	0	19/10/17- 03:00	0.8	04/11/17- 07:00	1.8	29/11/17- 16:00	0	26/11/20- 07:00	3.2	0.83	2.63
	02/11/15- 13:00	0			04/11/17- 08:00	1.8	29/11/17- 17:00	0	26/11/20- 08:00	3.5	0.76	2.40
	02/11/15-	0.7			04/11/17-	2.5	29/11/17-	0	26/11/20-	4.7	1.13	3.58

14:00		09:00		18:00		09:00			
02/11/15- 15:00	0.1	04/11/17- 10:00	0	29/11/17- 19:00	0	26/11/20- 10:00	3.8	0.56	1.77
02/11/15- 16:00	0	04/11/17- 11:00	0.3	29/11/17- 20:00	0	26/11/20- 11:00	0.7	0.14	0.45
02/11/15- 17:00	0	04/11/17- 12:00	0.2	29/11/17- 21:00	0	26/11/20- 12:00	1.3	0.21	0.68
02/11/15- 18:00	0	04/11/17- 13:00	0.1	29/11/17- 22:00	0	26/11/20- 13:00	0	0.01	0.05
02/11/15- 19:00	0	04/11/17- 14:00	0	29/11/17- 23:00	0	26/11/20- 14:00	0	0.06	0.18

Tabla 26. Precipitaciones usadas en el Método Alternativo del percentil 80.

REFERENCIAS

- [1] CEDEX, «Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España».
- [2] A. E. d. M. AEMET, «Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5».
- [3] C. Mora, «iAgua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/consuelo-mora/la-regulacion-del-agua-en-la-historia-de-los-pueblos-y-su-identidad-cultural>.
- [4] R. Herrero, «iAgua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/raul-herrero/ordenacion-zonas-inundables>.
- [5] Sistema Automático de Información Hidrológica del Guadalquivir, «Sistema Automático de Información Hidrol,» [En línea]. Available: <https://www.chguadalquivir.es/saih/DatosHistoricos.aspx>.
- [6] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps>. [Último acceso: 2021].
- [7] J.M.G, «Una fuerte tromba de agua causa daños e inundaciones en calles, empresas y viviendas de Lucena,» *Lucena Hoy*, vol. 2, nº 13, 2020.
- [8] L. S. N. y. M. G. Valentín, Ingeniería Hidrológica, Grupo Editorial Universitario.
- [9] I. G. y. M. d. E. (IGME), «Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie),» [En línea]. Available: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx?language=es>.
- [10] «Norma 5.2–IC de la Instrucción de Carreteras. Drenaje superficial».
- [11] Junta de Andalucía, «Red de Información Ambiental de Andalucía,» [En línea]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/acceso-rediam>.
- [12] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.

