

**TELEDETECCIÓN APLICADA A
MODELOS HIDROLÓGICOS HEC-
HMS: CUENCA ERESMA**

**TELEDETECTION APPLIED TO
HYDROLOGIC MODELS HEC-HMS:
ERESMA BASIN**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:
JOSÉ VIDAL OYARZO**

**Tutor:
ALEJANDRO DONATO MORALES**

**Tutor académico:
FRANCISCO CARREÑO CONDE**

Alcalá de Henares, a 07 de febrero de 2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional durante esta investigación, por brindarme tiempo y motivación, facilitándome el desarrollo del tema permitiéndome compatibilizarlo con el trabajo y formando a la persona en quien me he convertido. A mi pareja Francisca, por sus consejos sobre cómo abordar las dificultades, su tiempo, amor y paciencia cuando conversábamos sobre el tema. Mi amiga Yvone, por su soporte personal hasta el último momento antes de entregar el escrito.

A mi Tutor Alejandro, por instruirme en la metodología y documentos para posibilitarme confeccionar un estudio en otro país, abriéndome las puertas a nuevo conocimiento y posibilidades. A mi Tutor académico Francisco, por su pronta respuesta ante mis requerimientos.

A los profesionales de Agencia Estatal de Meteorología, por contestar mis dudas respecto al registro de información hidrológica en España y brindarme los datos de las estaciones meteorológicas, siempre con mucha diligencia.

Sin el apoyo de los mencionados anteriormente, quizás el barco no hubiera llegado al presente puerto.

ÍNDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
TABLA DE ABREVIATURAS	6
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	9
3. METODOLOGÍA	10
3.1. Zona de estudio	12
3.2. Teledetección	13
3.3. Parámetros morfológicos de la cuenca	14
3.3.1. Área de drenaje	16
3.3.2. Parámetros morfológicos subcuencas	16
3.4. Estudio hidrológico	18
3.4.1. Estaciones pluviométricas	18
3.4.2. Estudio estadístico de las series	21
3.4.1. Análisis de frecuencia de las series	22
3.4.2. Estimación de intensidad	24
3.5. Umbral de escorrentía y valor Curva Número	25
3.6. Polígonos de Thiessen	29
3.7. Confección modelo hidrológico HEC-HMS	30
3.7.1. Modelo de la cuenca	31
3.7.2. Métodos y parámetros utilizados en elementos hidrológicos	33
3.7.3. Modelo Meteorológico	34
3.7.4. Especificaciones de control	35
3.8. Dato de caudal para evento con periodo de retorno de 500 años	35

3.9. Calibración	36
3.10. Modelo hidrológico con datos de precipitación de teledetección	37
4. RESULTADOS	38
4.1. Comportamiento estadístico datos satelitales	38
4.2. Caudales pico de los modelos hidrológicos	40
4.3. Hidrogramas modelos hidrológicos	41
5. DISCUSIÓN	44
5.1. Datos de precipitación obtenidos mediante teledetección.....	44
5.2. Resultados caudales modelo hidrológico	45
5.3. Distribución de la precipitación.....	45
6. CONCLUSIONES	47
7. BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS.....	50
Anexo 1: Máxima precipitación mensuales y anuales de estaciones (mm)	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema metodología.....	12
Figura 3.2 Ubicación cuenca de estudio.....	12
Figura 3.3 Instrumentos del TRMM. Radar Meteorológico (PR), sensor de microondas (TMI)y sensor de luz visible (VIRS)	13
Figura 3.4 Gráfico serie de precipitación promedio diaria para la cuenca.	14
Figura 3.5 Delimitación cuenca Eresma, incluyendo red hidrográfica y MDT.....	15
Figura 3.6 Subcuencas de cuenca Eresma.	17
Figura 3.7 Ubicación estaciones pluviométricas y cuenca Eresma.	19
Figura 3.8 Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS	26
Figura 3.9 Valores Umbral de escorrentía en cuenca Eresma.	27
Figura 3.10 Valores Curva Numero en cuenca Eresma.	28
Figura 3.11 Áreas de influencia de estaciones sobre subcuencas.	30
Figura 3.12 Modelo Hec-hms con elementos hidrológicos.	31
Figura 3.13 Iconos elementos hidrológicos en Hec-HMS.....	32
Figura 4.1 Gráfico valores estadísticos estaciones.	38
Figura 4.2 Gráfico de PMD para para los diferentes periodos de retorno.	39
Figura 4.3 Hidrogramas resultantes de ambos modelos.	41
Figura 4.4 Resumen comparativo entre modelos de Hec-HMS.....	42
Figura 4.5 Hidrogramas tramo 4 y tramo 3.....	43
Figura 4.6 Hidrograma tramo 2 y tramo 1.....	43
Figura 5.1 Mapa precipitaciones promedio (mm).	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros morfológicos cuenca Eresma.	15
Tabla 3.2 Parámetros morfológicos subcuencas.	17
Tabla 3.3 Tiempo de concentración y retardo subcuencas.....	18
Tabla 3.4 Estaciones pluviométricas en zona de estudio.	18
Tabla 3.5 Cantidad meses con datos completos en las estaciones.....	20
Tabla 3.6 Análisis estadístico estaciones en estudio.	21
Tabla 3.7 Distribuciones seleccionadas y valores PMD para diferentes periodos de retorno.....	23
Tabla 3.8 Intensidad para evento de duración 32 horas con T=500 años.	24
Tabla 3.9 Valores de P0 y CN promedio en las subcuencas.	28
Tabla 3.10 Porcentaje de área de influencia sobre subcuencas.....	30
Tabla 3.11 Elementos hidrológicos constituyentes de modelo de cuenca.	32
Tabla 3.12 Caracterización de tramos.	34
Tabla 3.13 Resultado calibración de parámetros.....	37
Tabla 4.1 Comparación picos de hidrogramas para los elementos.	40
Tabla 4.2 Suma de caudales pico en la salida de elementos.	41

TABLA DE ABREVIATURAS

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CLC: CORINE LAND COVER

CN: Curva Número:

GEV: Generalized Extreme Value

Hec-HMS: Hydrologic Modeling System

I: Intensidad

IGN: Instituto Geográfico Nacional de España

MDT: Modelo Digital de Terreno

MITECO: Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico de España

mm: Milímetro

NASA: National Aeronautics and Space Administration

OMM: Organización Meteorológica Mundial

P: Precipitación

P0: Umbral de escorrentía

Pe: Precipitación efectiva

PMD: Precipitaciones Máximas Diarias

Porcentaje: %

Q: Caudal

SCS: Soil Conservation Service

SIG: Sistema de Información Geográfica

T: Periodo de retorno

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: TMPA

RESUMEN

En el presente estudio se comparan dos modelos hidrológicos Hec-HMS en la cuenca del río Eresma (Cuenca del Duero), el primero confeccionado con datos de precipitación obtenidos de la misión TRMM y el segundo con precipitaciones de 9 estaciones pluviométricas. Complementariamente, se realiza una comparación estadística entre los datos de precipitación de diferente procedencia y un análisis de frecuencia de las series para calcular las precipitaciones correspondientes a diferentes periodos de retorno, finalmente se comparan los caudales e hidrogramas simulados en los diferentes elementos de los modelos hidrológicos Hec-HMS para una condición de evento extremo con periodo de retorno de 500 años.

Los resultados entregan información respecto del comportamiento de las series de precipitación de datos obtenidos mediante teledetección y su aplicabilidad en estudios hidrológicos, siendo una valiosa fuente de información en zonas en las que no exista o se cuente con pobre información pluviométrica.

De las series de precipitaciones ajustadas a distribuciones estadísticas, se estima que, para la precipitación máxima diaria con periodo de retorno de 2 años el valor para los datos de la misión TRMM es 35.8 mm, siendo mayor al promedio de las estaciones pluviométricas en la cuenca que es de 30.1 mm, posicionándose por encima del valor de las estaciones. No obstante, para la condición de periodo de retorno de 500 años, el valor calculado para la serie del TRMM es 75.5 mm, aproximándose al promedio de las estaciones en la zona de estudio, con un valor de 70.9 mm, ubicándose cuarta al ordenarse de mayor a menor con las 9 estaciones pluviométricas, reflejando la variabilidad de la cuenca.

El resultado de la modelación da cuenta de un buen ajuste del modelo con precipitación del TRMM al modelo de estaciones pluviométricas calibrado, con una diferencia de caudal máximo de 5.2% en el punto de desfogue la cuenca, con un coeficiente de Nash-Sutcliffe 0.986 y Percent BIAS de 4.3% entre los hidrogramas. Simulándose de manera correcta un caudal de evento extremo utilizándose precipitación de la misión TRMM, ofreciendo una alternativa para la modelación de caudales extremos en zonas sin o con escasa información pluviométrica.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el acceso al agua ha sido un factor clave en el desarrollo de grandes asentamientos humanos, siendo un recurso renovable, pero finito y esencial para la subsistencia. No obstante, el peligro originado por eventos extraordinarios de crecidas ha llevado a la búsqueda de la reducción de vulnerabilidad ante estas. En este contexto, estos eventos con elevados periodos de retorno son considerados condiciones de diseño para obras hidráulicas y categorización de zonas de inundación (OMM, 2011). La presente investigación trata sobre la confección de un modelo hidrológico en Hec-HMS, aplicando información obtenida mediante teledetección para la simulación de un evento extremo.

Para la estimación de caudales con elevados periodos de retorno se recomienda de una larga serie de datos fluviométricos, los cuales no siempre se encuentran disponibles, por lo que se han desarrollado diversas metodologías y modelos para la determinación de los caudales en base a la precipitación. De la precipitación, se requieren series de datos medidos por estaciones en terreno (Ministerio de Medio Ambiente y medio Rural y Marino, 2011a), las cuales se enfrentan a problemas debido al requerimiento de mantención y, a veces, baja distribución espacial, produciendo que existan zonas de escasa o nula información pluviométrica.

Considerando lo anterior, la teledetección, es decir, el conjunto de técnicas de obtención de información de la superficie terrestre mediante sensores satelitales, ofrece una alternativa con información continua en el tiempo y espacio, solucionando los problemas de requerimiento de instrumentos en terreno. En otras palabras, ofrece una alternativa para zonas de escasa información pluviométrica o para mejorar la calidad de información disponible.

En la presente investigación se plantea la elaboración de un modelo con datos obtenidos mediante estaciones en terreno y otro con datos satelitales, para, finalmente, comparar el resultado de ambos modelos. La información en la cual diferirán ambos será en la precipitación y se evaluará el resultado obtenido en los caudales para eventos extremos.

Cabe destacar que, para la determinación de eventos extremos, se suele trabajar con series de datos anuales menores que los periodos de retorno, por lo que para la estimación de valores con altos periodos de retorno se ajusta la serie de datos a distribuciones estadísticas. Al medir una variable, mediante diferentes instrumentos y sensibilidades, es posible que existan diferencias sistemáticas, las cuales pueden afectar valores bajos, medios o máximos. En el caso de estudio, se evalúan condiciones extremas, por lo que se comparará la precipitación para diferentes periodos de retorno, entre los datos obtenidos mediante teledetección y estaciones pluviométricas, además de realizar un análisis estadístico de ambas.

En la actualidad, se han realizado diversos estudios comparando la precipitación medida con valores obtenidos por teledetección, determinando que el desempeño varía espacialmente (Senent-Aparicio et al., 2018b), por lo que es importante realizar un estudio o análisis previo a la utilización de datos obtenidos de teledetección en una cuenca o sector.

2. OBJETIVOS

Para la estimación de condiciones extremas, lo recomendado es realizar un análisis de frecuencia de los datos de caudal, medidos mediante una estación de aforo del punto en estudio (estaciones fluviométrica). Lo anterior, no siempre es posible, por lo que se han definido metodologías de cálculo sin información fluviométrica, principalmente basándose en métodos empíricos o modelos hidrológicos, relacionando la precipitación y escorrentía, entendiéndose por precipitación el evento de caída del agua contenida en la atmosfera al suelo, mientras que, por escorrentía, el escurrimiento del agua, vertiendo en los diferentes cauces.

La precipitación, a diferencia de otros parámetros hidrológicos, se caracteriza por ser discontinua tanto espacial como temporalmente, puede involucrar eventos con intervalos de duración de horas o días, pueden ser estáticos o fenómenos móviles. En cuanto a las magnitudes, estas pueden variar desde décimas hasta más de 100 mm por hora. Para la determinación de la precipitación se usan diferentes instrumentos, los mismos requieren emplazarse en el sitio que registran los datos y mantenimiento, por lo que, en zonas aisladas, no es raro contar con series

discontinuas o baja cantidad de datos por área. Como alternativa, la información obtenida mediante teledetección presenta datos continuos espacial y temporalmente, además de encontrarse distribuidos zonalmente.

El objetivo principal de esta investigación es comparar los caudales extremos de un modelo hidrológico con datos obtenidos mediante teledetección frente a un modelo de datos medidos mediante pluviómetros, para la cuenca Eresma (Cuenca hidrográfica del Duero).

Como objetivos secundarios se plantean:

- Determinar los valores precipitación e intensidad para eventos extremos, mediante la realización del estudio hidrológico en la cuenca.
- La comparación del comportamiento estadístico de las series de datos satelitales y pluviométricos en un mismo intervalo de tiempo.
- La confección y calibración del modelo Hec-HMS con datos pluviométricos y la implementación del modelo con datos satelitales.

3. METODOLOGÍA

En el presente estudio se plantea comparar dos modelos hidrológicos en el software Hec-HMS, el primero confeccionado con datos de precipitación obtenidos de estaciones pluviométricas, mientras el segundo, confeccionado con datos de precipitación obtenidos mediante teledetección. Al diferenciarse ambos modelos únicamente en las precipitaciones ingresadas, se confecciona primero el modelo con la precipitación de las estaciones pluviométricas, luego, se calibrará de acuerdo el caudal pico del hidrograma resultante y al modelo calibrado se le modificarán los datos de precipitación, ingresando los obtenidos mediante teledetección. El caudal a modelar corresponde al caudal con periodo de retorno 500 años, esto debido a que es una condición de diseño para presas y determinación de zonas de inundaciones.

La confección del modelo hidrológico en Hec-HMS, posee tres componentes principales: modelo de cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control.

Los elementos hidrológicos que componen el modelo de cuenca se pueden delimitar en Hec-HMS mediante el MDT. Los elementos a utilizar en el modelo son: subcuencas, tramos, uniones y sumidero, en estos ocurren procesos hidrológicos, los cuales requieren ser modelados las metodologías disponibles. Para las subcuencas, se estima la abstracción o pérdidas, en base al umbral de escorrentía y el valor Curva Número, en los tramos se realiza el rastreo de crecidas, mientras que las uniones y sumideros, son elementos que suman y cuantifican caudales.

Para la confección del modelo meteorológico se plantea un estudio hidrológico. El estudio hidrológico tiene como fin caracterizar cuantitativamente la precipitación en la zona de estudio. Para lo anterior, se analizará la información pluviométrica en la cuenca y alrededores, escogiendo las estaciones que posteriormente se ingresarán al modelo. Las estaciones seleccionadas se someterán a un análisis de frecuencia para determinar las distribuciones estadísticas a las que más se aproximen y, posteriormente, determinar los valores de precipitación para eventos extremos.

Finalmente, para cada estación seleccionada, a partir de la precipitación máxima diaria con periodo de retorno 500 años, se calcula la intensidad correspondiente para un evento con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Esta intensidad es ingresada al modelo meteorológico del modelo hidrológico Hec-HMS. Se comparan los valores de precipitación a usar en ambos modelos mediante coeficientes estadísticos y la comparación de los valores de precipitación para diferentes periodos de retorno. Posteriormente, se caracteriza la distribución espacial de la precipitación para ingresar al modelo, mediante el método polígonos de Thiessen.

En las especificaciones de control, se configura los tiempos de modelación e intervalos de cálculos del modelo.

Una vez confeccionado el modelo con datos de estaciones, se calibran los resultados con caudales del Mapa de caudales máximos en régimen natural (CAUMAX). Luego, se modifica el modelo calibrado ingresando en el modelo meteorológico la precipitación obtenida de la misión TRMM. Finalmente, se compara el desempeño de ambos modelos, comparando los caudales e

hidrogramas resultantes.

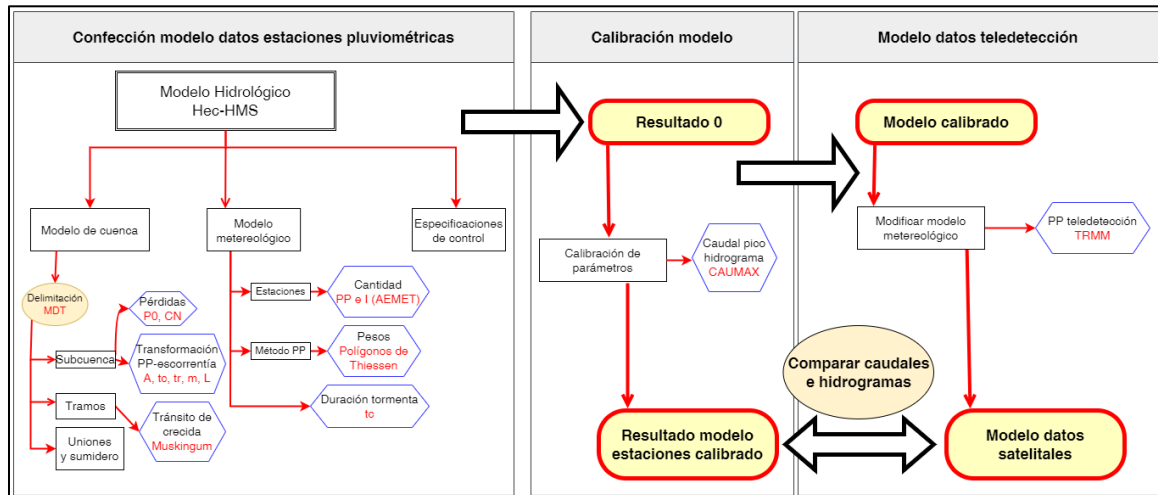


Figura 3.1 Esquema metodología

3.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde al río Eresma, ubicado en la cuenca homónima, perteneciente a la Cuenca Hidrográfica del Duero. Este río escurre en su trazado entre las provincias de Segovia y Valladolid, posee una superficie aproximada de 2.940 km², una longitud de 134 km y un caudal medio de 7.5 m³/s. Nace en el Valle de Valsaín, originándose de la confluencia de distintos arroyos. Aguas abajo se unen como afluentes el río Moros y el río Voltoya, finalmente desembocando en el río Adaja, este a su vez, tras 30 km de recorrido, desemboca en el río Duero. La ubicación de la cuenca se visualiza en la **Figura 3.2**:

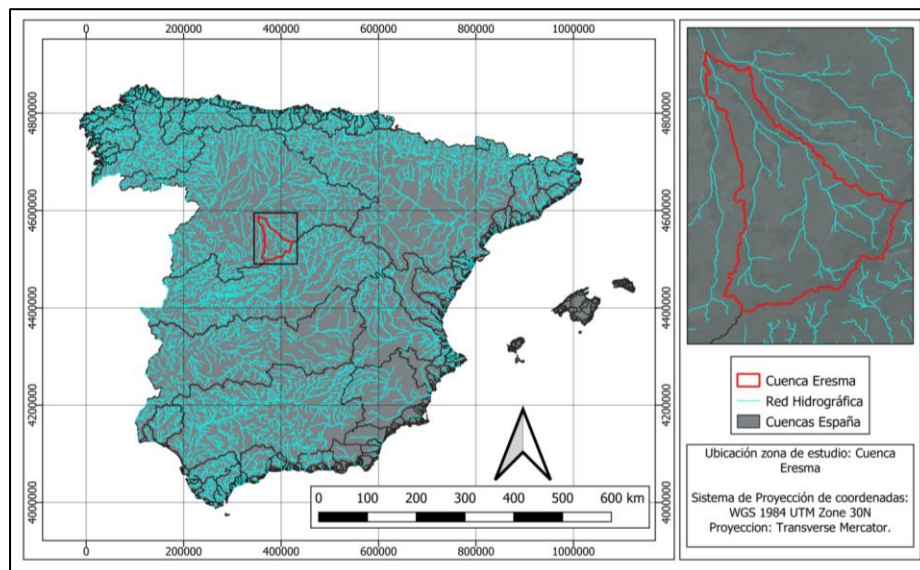


Figura 3.2 Ubicación cuenca de estudio.

3.2. Teledetección

El uso de la detección en para determinar la precipitación ha sido estudiada desde finales de los años 60, estimándola en base a los espectros visibles e infrarrojos obtenidos de las imágenes satelitales. Existen diversas metodologías para la estimación de la precipitación, aunque la mayoría pueden subestimar los valores para eventos de grandes precipitaciones y sobrestimar los pequeños (Dzouza et al., 1990). No obstante, se poseen ventajas sobre los valores medidos mediante métodos tradicionales, ya que son valores continuos en el tiempo y espacio, además de proporcionar una cobertura zonal.

En el presente trabajo se utilizó información del TRMM (Misión de medición de lluvias tropicales o *Tropical Rainfall Measuring Mision*). Siendo una misión de la NASA diseñada para estudiar y monitorear las precipitaciones tropicales y subtropicales, entre las latitudes 35° N y 35° S. La misión se mantuvo en operación desde el año 1997 hasta junio de 2015, momento en que el TRMM se apagó y regresó a la atmosfera. Entre sus principales instrumentos se encuentran: el radar de precipitación (PR), el cual provee información tridimensional de las estructuras de las tormentas y una sensibilidad para la intensidad de hasta 0.5 mm/hr; Imágenes por microondas del TRMM (TMI), siendo un sensor de microondas pasivo diseñado para estimar información cuantitativa de las lluvias en relación con la intensidad de la precipitación y el tipo de esta y; finalmente, el Escáner infrarrojo visible (VIRS), siendo un indicador indirecto de la lluvia, el cual permite delinear la misma, proveyendo observaciones de la cobertura y tipo de nubes, además de la temperatura en su cima. En la **Figura 3.3** se presentan los instrumentos del TRMM:

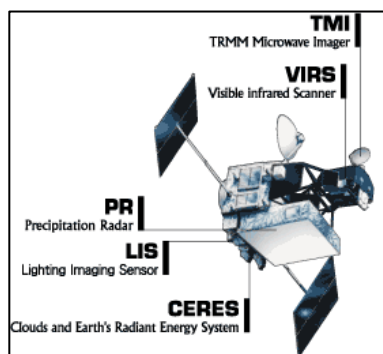


Figura 3.3 Instrumentos del TRMM. Radar Meteorológico (PR), sensor de microondas (TMI) y sensor de luz visible (VIRS). Fuente: www.gpm.nasa.gov/missions/TRMM/satellite

La NASA ha dispuesto de la Plataforma web Giovanni, para visualizar, acceder y

descargar la información de sus diferentes productos satelitales. Para el TRMM, existen 18 productos, para el presente trabajo se ha seleccionado el producto TRMM 3B42 versión 7 (3B42 V7), siendo un producto grillado, el cual posee una resolución temporal de 3 horas y una resolución horizontal de 0.25°. Se elige este producto ya que posee mayor cantidad de resolución tanto temporal como espacial, además de comprender una cobertura geográfica entre las latitudes 50° N y 50°, abarcando el área de estudio, lo cual posibilita realizar análisis similares a los que se realizan con datos típicos de precipitación.

En la plataforma Giovanni, al ingresar el polígono de la cuenca, se descargó la precipitación diaria, promedio en la zona de estudio, para la totalidad del intervalo en el que el producto poseía datos, correspondiendo al intervalo entre el 01 de enero de 1998 hasta 31 de diciembre de 2019. Cabe destacar que se poseen datos de la misión TRMM de manera posterior al descenso del satélite a la atmosfera, debido a que se completó la información con TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA).

En la **Figura 3.4** se presentan los valores de precipitación diarios entregados por la plataforma para la cuenca de estudio. Asimismo, se visualizan los valores de precipitación promedio diarios, entregados por la plataforma:

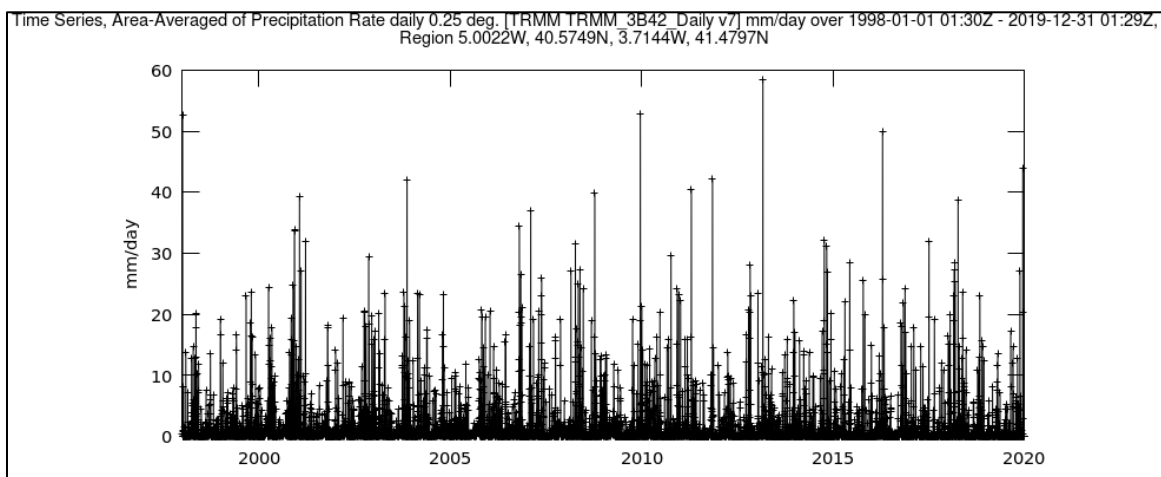


Figura 3.4 Gráfico serie de precipitación promedio diaria para la cuenca generado en plataforma Giovanni.

3.3. Parámetros morfológicos de la cuenca

Se determinan los parámetros morfológicos de la cuenca mediante herramientas

del software QGis y Hec-HMS, utilizando el modelo digital de terreno. Del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) se descargaron: las capas de cuencas, subcuencas, hidrografía y el modelo digital de terreno con una resolución del tamaño de malla de 5 y 25 m. En la **Figura 3.5**, se presenta el polígono de la cuenca Eresma, sus principales cauces y el modelo digital de terreno, obtenido de IGN:

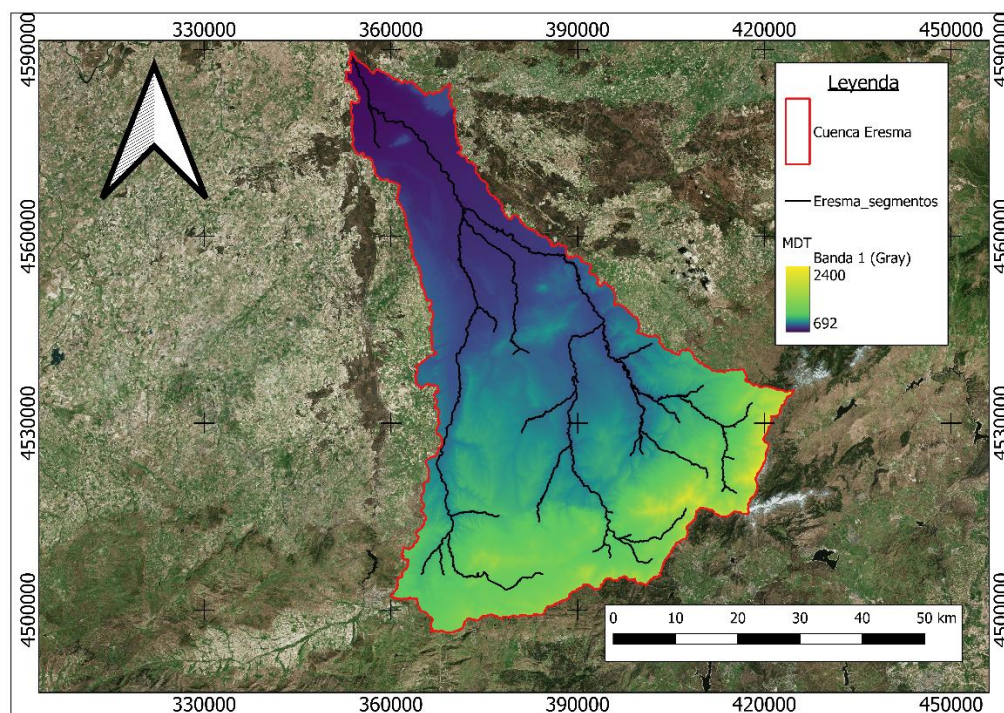


Figura 3.5 Delimitación cuenca Eresma, incluyendo red hidrográfica y elevaciones MDT.

En base al MDT y mediante la herramienta de QGis de Análisis espacial, además comprobado mediante la herramienta de caracterización de cuencas de Hec-HMS, se determinaron los parámetros morfológicos de la cuenca: desnivel, pendiente media de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal y densidad de drenaje. Los resultados se presentan en la **Tabla 3.1**:

Tabla 3.1 Parámetros morfológicos cuenca Eresma.

Parámetro	Valor
Cota mínima y máxima (m)	694 y 2422
Desnivel (m)	1728
Longitud del cauce principal (km)	145
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0.08935
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0.00970
Densidad de drenaje (km/m ²)	0.08802

Se estimó el tiempo de concentración de la cuenca según la fórmula de Temez de 1987 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011):

$$T_c = \left(\frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76} \quad [1]$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración de la cuenca en (horas)

L : Longitud del cauce principal (km)

J : Pendiente del cauce principal en (m/m)

Adicionalmente, se estimó el tiempo de retardo según lo recomendado en el Manual de Hec-HMS (US Army Corps of Engineers, 2022a):

$$T_r \sim 0.6 * T_c \quad [2]$$

Obteniendo un valor para el tiempo de concentración de **31.8 horas** y para el tiempo de retardo de **19.08 horas**.

3.3.1. Área de drenaje

Área de drenaje, o también denominada cuenca aportante, corresponde al área comprendida desde la línea divisora de aguas, que drena hacia el punto de desfogue de la cuenca. Se determina mediante la herramienta Raster de Qgis y la herramienta de caracterización de cuencas de Hec-HMS, en base al modelo digital de terreno. En ambas herramientas, se debe rellenar los vacíos de información del MDT y definir el punto de desfogue, que corresponde al punto aguas abajo de la red hidrográfica descargada. A partir de lo anterior, se obtiene un valor de área de drenaje de 2872.7 km².

3.3.2. Parámetros morfológicos subcuencas

Mediante Hec-HMS, y el MDT pre-procesado de la cuenca se pueden delinear diferentes elementos de la misma, para el caso de las subcuencas, el tamaño mínimo depende del área mínima que se configure para la determinación de área drenante en la definición de cauce. Al procesar el MDT se obtuvieron 9 subcuencas, las cuales se presentan en la **Figura 3.6**:

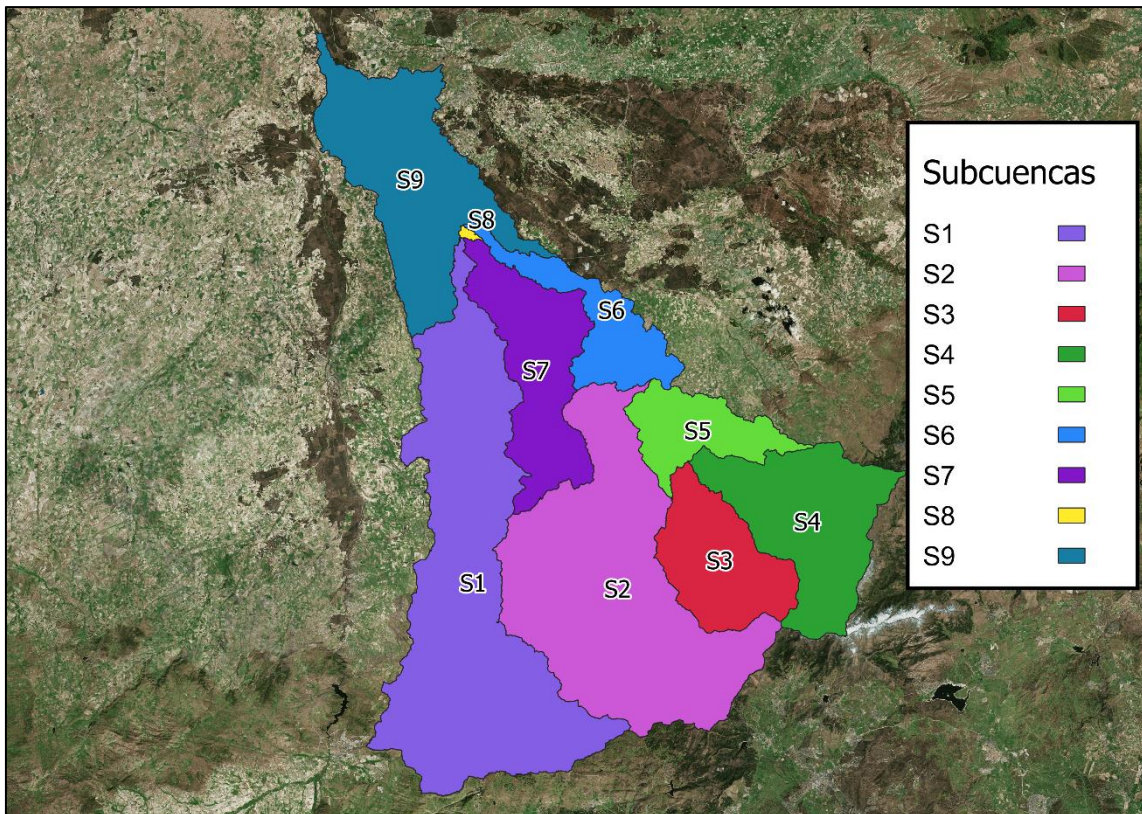


Figura 3.6 Subcuencas de cuenca Eresma.

Mediante el MDT, las subcuencas delimitadas y la herramienta Análisis espacial de QGis, se determinan los parámetros morfológicos de las subcuencas, estos son presentados en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Parámetros morfológicos subcuencas.

Sub-cuenca	Área (km ²)	Longitud del cauce principal (km)	Pendiente media de la cuenca (m/m)	Pendiente media del cauce principal (m/m)	Densidad de drenaje (km/m ²)
S1	786.1	106.8	0.081	0.009	0.086
S2	686.5	70.4	0.106	0.018	0.071
S3	199.2	32.9	0.143	0.040	0.054
S4	297.7	42.1	0.191	0.032	0.076
S5	131.3	34.1	0.063	0.009	0.124
S6	140.5	48.1	0.069	0.004	0.300
S7	247.2	49.9	0.030	0.005	0.049
S8	2.7	5.6	0.065	0.008	0.987
S9	381.5	56.4	0.029	0.004	0.098

A partir de los parámetros morfológicos de las subcuencas, usando además la

ecuación [1] y [2], se estiman los parámetros el tiempo de concentración y retardo, resultados que se presentan en la **Tabla 3.3**:

Tabla 3.3 Tiempo de concentración y retardo subcuencas.

Subcuenca	Tc (hrs)	Tr (hrs)
S1	15.9	9.5
S2	9.9	5.9
S3	7.9	4.7
S4	16.3	9.8
S5	25.6	15.3
S6	10.6	6.4
S7	15.9	9.5
S8	2.8	1.7
S9	18.6	11.1
Cuenca	31.8	19.1

3.4. Estudio hidrológico

3.4.1. Estaciones pluviométricas

Para la confección del modelo hidrológico con datos de precipitación, se escoge trabajar con la misma ventana de tiempo, de la cual se disponen datos satelitales. Por lo tanto, se solicita a AEMET la información horaria, diaria y mensual, en el periodo entre el 01 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2019, de 18 estaciones que se encuentran alrededor de la cuenca, las estaciones solicitadas, se lista en la **Tabla 3.4**:

Tabla 3.4 Estaciones pluviométricas en zona de estudio.

N°	Indicativo	Nombre	Altitud (msnm)	UTM X (m)	UTM Y (m)	Datum
1	2199	Cantimpalos	912	402918	4547140	ETRS89
2	2444	Ávila	1130	357981	4502280	ETRS89
3	2446	Mingorría	1032	359148	4512368	ETRS89
4	2459	Rapariegos	854	361038	4550277	ETRS89
5	2460	San Cristóbal de la Vega	867	361895	4552420	ETRS89
6	2461	Matapozuelos	730	350084	4586127	ETRS89
7	2465	Segovia	1005	405190	4533294	ETRS89
8	2467	Otero de herreros	1130	397947	4519289	ETRS89
9	2468D	Embalse del Pontón Alto	1180	407554	4523049	ETRS89
10	2471Y	San Rafael	1237	397640	4508228	ETRS89
11	2474	Navas de San Antonio	1150	387656	4512806	ETRS89
12	2477	Lastras del pozo	967	386450	4525934	ETRS89

N°	Indicativo	Nombre	Altitud (msnm)	UTM X (m)	UTM Y (m)	Datum
13	2479	Villacastín	1095	380656	4515075	ETRS89
14	2482B	Miguelañez	870	384510	4553700	ETRS89
15	2483	Navas de oro	807	379308	4561366	ETRS89
16	2495	Jemenuño	962	374062	4534000	ETRS89
17	2497	Martin Muñoz de las posadas	892	365620	4539240	ETRS89
18	2503B	Olmedo, depósito agua	786	358306	4571222	ETRS89

En la **Figura 3.7**, se visualiza la ubicación espacial de las estaciones solicitadas, lo cual permite determinar la existencia de variadas estaciones en la cuenca y que se encuentran distribuidas en diferentes zonas de esta:

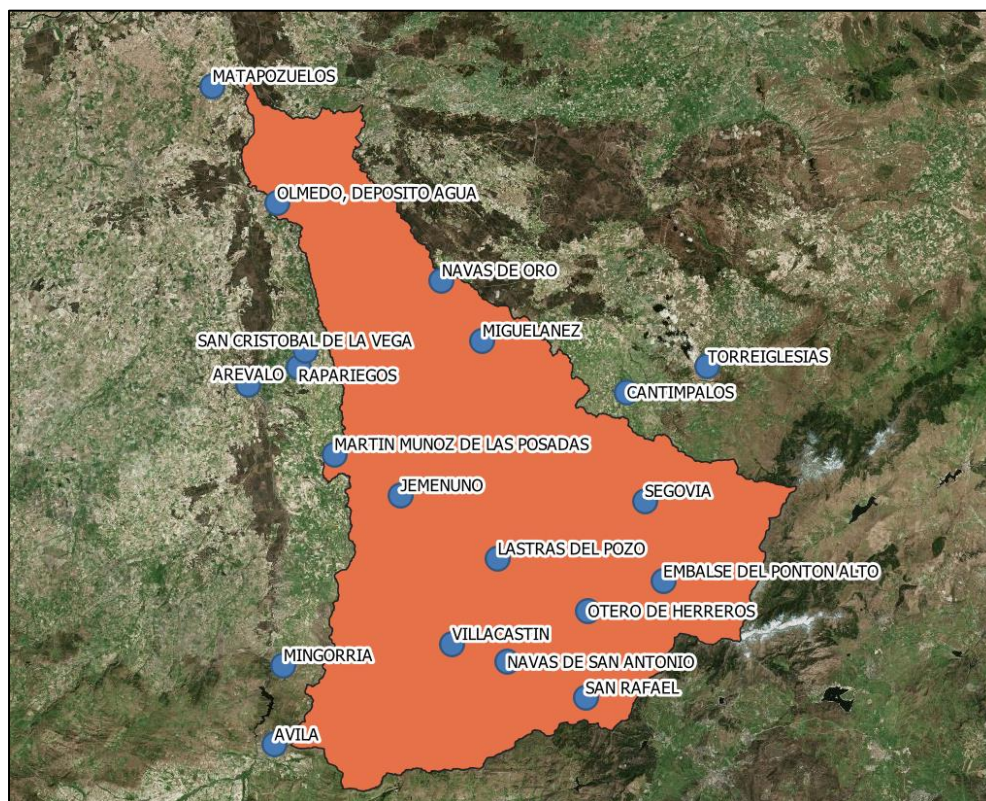


Figura 3.7 Ubicación estaciones pluviométricas y cuenca Eresma.

Se analizan los datos diarios de precipitación de las estaciones, verificando la cantidad de meses de los cuales se posee información completa, del total de meses en el intervalo de estudio. En la **Tabla 3.5**, se señala la cantidad de meses, de los que se disponen información en las estaciones:

Tabla 3.5 Cantidad meses con datos completos en las estaciones.

N°	Ind.	Nombre	Inicio serie de datos	Fin serie de datos	Meses con datos	% de meses
1	2199	Cantimpalos	01-10-1954	31-12-2019	262	99.2
2	2444	Ávila	01-01-1983	31-12-2019	264	100.0
3	2446	Mingorría	01-03-1935	31-12-2019	262	99.2
4	2459	Rapariegos	01-08-1947	31-12-2019	260	98.5
5	2460	San Cristóbal de la Vega	01-04-1955	31-12-2019	263	99.6
6	2461	Matapozuelos	01-05-1945	31-12-2019	259	98.1
7	2465	Segovia	01-10-1988	31-12-2019	264	100.0
8	2467	Otero de herreros	01-02-1936	31-12-2019	256	97.0
9	2468 D	Embalse del Pontón Alto	01-12-1997	31-12-2019	253	95.8
10	2471Y	San Rafael	01-05-2003	31-12-2019	189	71.6
11	2474	Navas de San Antonio	01-02-1966	31-12-2019	250	94.7
12	2477	Lastras del pozo	01-02-1936	31-12-2019	263	99.6
13	2479	Villacastín	01-03-2000	31-12-2019	236	89.4
14	2482B	Miguelañez	01-10-2008	31-12-2019	121	45.8
15	2483	Navas de oro	01-09-1947	31-12-2019	250	94.7
16	2495	Jemenuño	01-03-1966	31-12-2019	248	93.9
17	2497	Martin Muñoz de las posadas	01-08-1931	31-12-2019	246	93.2
18	2503B	Olmedo, depósito agua	01-09-2008	31-12-2019	133	50.4

A nivel general, se aprecia que existe suficiente cantidad de datos en las estaciones, encontrándose 10 con información para más del 95% de los meses, 4 con porcentajes de meses completos entre el 90 y 95% y, finalmente, 4 con porcentajes menores a 90%, estas iniciando su serie de datos de manera posterior al intervalo de estudio.

Para la elección de las estaciones que se utilizarán en el estudio hidrológico, se utilizarán las que tengan mayor cantidad de información y las que posean mejores coeficientes estadísticos. En consideración de los criterios de elección, no se ocuparán para el estudio hidrológico las estaciones de San Rafael, Villacastín, Miguelañez y Olmedo, depósito de agua, por iniciar las series de datos de manera posterior al intervalo de estudio. Además, se debe considerar que las estaciones Navas de San Antonio, Navas de oro, Jemenuño y Martín Muñoz de las posadas poseen menor cantidad de datos a diferencia de las demás, por lo requieren ser rellenadas para introducir los datos al modelo y para su inclusión en el modelo, se verificarán sus coeficientes estadísticos.

A continuación, para cada estación pluviométrica, se determinan los valores de precipitación máximos diarios mensuales y entre ellos los valores máximos diarios anuales, estos son organizados en las tablas que se presentan en el Anexo 1, además se realiza el mismo procedimiento con los datos satelitales diarios.

3.4.2. Estudio estadístico de las series

Para realizar el estudio estadístico de las series de datos, se utiliza el software CHAC 5.07, el cual fue desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), con el fin de proporcionar una herramienta útil para el desarrollo de trabajos hidrológicos.

Se ingresan al software CHAC las series hidrológicas de máximos diarios mensuales, de las 14 estaciones pluviométricas, además de la serie de datos satelital (TRMM), siendo denominada "Satel". A continuación, se utiliza la herramienta Estadístico del software, la cual determina, el promedio de los valores, el coeficiente de varianza (CV) y coeficiente de sesgo (CS) de cada serie anual.

El coeficiente de variación es una medida adimensional de la variabilidad, mientras que el coeficiente de sesgo es un estimativo de la asimetría, correspondiendo al tercer momento alrededor de la media. Si los datos tienen una asimetría pronunciada, un pequeño número de valores extremos causa un efecto significativo en la media aritmética (Chow, 1994). Por lo mismo, al considerar un periodo de estudio de 22 años, no siendo muy extenso, se evitará la selección de estaciones que posean elevados coeficientes. Los resultados del análisis estadístico obtenido se presentan en la **Tabla 3.6:**

Tabla 3.6 Análisis estadístico estaciones en estudio.

Indicativo	Nombre	Media	CV	CS
2199	Cantimpalos	36.7	0.323	0.766
2444	Ávila	28.8	0.309	0.594
2446	Mingorría	29.3	0.330	0.798
2459	Rapariegos	32.5	0.287	0.216
2460	San Cristóbal de la Vega	33.2	0.262	0.618
2461	Matapozuelos	29.9	0.347	0.503
2465	Segovia	28.8	0.229	0.304
2467	Otero de herreros	39.5	<u>0.476</u>	<u>1.264</u>
2468D	Embalse del Pontón Alto	33.5	0.244	0.574

Indicativo	Nombre	Media	CV	CS
2474	Navas de San Antonio	35.5	0.380	0.586
2477	Lastras del pozo	35.3	<u>0.439</u>	<u>1.811</u>
2483	Navas de oro	29.4	0.221	0.280
2495	Jememuño	36.8	<u>0.536</u>	<u>2.085</u>
2497	Martin Muñoz de las posadas	36.5	0.314	<u>0.870</u>
Satel	Satelital	36.9	0.276	0.452

Las estaciones con los coeficientes de variación más altos corresponden a Jememuño, Otero de herreros y Lastras del pozo (valores mayores a 0.4), para el caso del coeficiente sesgo (valores mayores a 0.8) corresponden a Jememuño, Lastras del pozo, Otero de herreros y Martin Muñoz de las Posadas. Se debe notar que Navas de oro y Navas de San Antonio, poseen buenos valores de coeficientes estadísticos, al igual que los datos obtenidos de la misión TRMM.

A continuación, se rellenan las estaciones de Navas de oro y Navas de San Antonio, con las demás estaciones de la cuenca para su inclusión en el modelo. Tanto Jememuño como Martin Muñoz de las posadas, poseen menos del 95% de cantidad de datos mensuales, así como altos valores de coeficientes, por lo que no serán considerados en el modelo hidrológicos. También se descartan del modelo las estaciones Lastras del pozo y Otero de herreros, por tener altos valores de coeficientes. La estación San Cristóbal de la Vega, no se incluirá al modelo, por su similitud y cercanía geográfica a la estación Rapariegos, en consideración de que se incluirán los datos de las estaciones mediante polígonos de Thiessen al modelo y son estaciones tanto cercanas como similares.

Finalmente, en el modelo hidrológico con datos de pluviómetros, se incluirán los datos de 9 estaciones: Ávila, Cantimpalos, Embalse de Pontón Alto, Matapozuelos, Mingorria, Navas de Oro, Navas de San Antonio, Rapariegos y Segovia.

3.4.1. Análisis de frecuencia de las series

A partir de la serie de máximos anuales, correspondiendo al mayor valor de precipitación de cada año de registro completo, se realiza el análisis de frecuencia, con el fin de seleccionar el modelo al cual la serie de datos se ajuste de mejor manera, permitiendo estimar valores esperables para la variable en estudio, en este

caso, la estimación de las precipitaciones máximas diarias (PMD) correspondientes a los diferentes periodos de retorno.

Para el análisis de máximos anuales, se considerarán series que se utilizan en para variables hidrológicas según bibliografía: Generalized Extreme Value, Generalized Gamma, Log-Pearson 3, LogNormal, Weibull, Normal, Pearson 3, LogNormal 3 y Gumbel y Exponencial (Chow, 1994). El análisis se realizará mediante el software EasyFit, el cual, al ingresar las series de datos y seleccionar las distribuciones a evaluar, realiza pruebas de bondad de ajuste, específicamente, la prueba de Komogorov-Smirnov y el Chi-cuadrado, ordenando las distribuciones, según las que tengan mejor estadístico para el test, para ambos test un mejor ajuste corresponde a un valor menor en el estadístico. La prueba de Komogorov-Smirnov (K-S) compara la función de distribución observada de una variable con una distribución teórica, en este caso de una distribución, mientras que la prueba de Chi-cuadrado contrasta los valores observados con los valores esperados de la distribución. Para la selección de la mejor distribución para cada estación, se seleccionará la distribución que tenga mejores resultados con ambas pruebas.

En la **Tabla 3.7** se presenta la distribución que presenta mejor resultados en las pruebas de bondad de ajuste para cada estación en estudio. Además, se presentan los valores de precipitación para diferentes periodos de retorno, en consideración de la distribución escogida:

Tabla 3.7 Distribuciones seleccionadas y valores PMD para diferentes periodos de retorno.

Estación	Distribución	PP (mm) correspondiente a periodo de retorno (años)					
		2	5	10	25	100	500
Ávila	GEV	27.8	36.1	41.0	46.7	54.2	61.5
Cantimpalos	Weibull 3P	33.5	45.5	53.6	63.7	77.9	93.4
Embalse de Pontón Alto	Gumbel	32.1	39.4	44.2	50.2	59.1	69.4
Matapozuelos	GEV	28.9	38.5	44.1	50.5	58.7	66.4
Mingorria	Gamma	27.0	36.3	42.7	50.8	62.5	75.8
Navas de Oro	GEV	29.0	35.0	38.3	42.0	46.3	50.1

Estación	Distribución	PP (mm) correspondiente a periodo de retorno (años)					
		2	5	10	25	100	500
Navas de San Antonio	GEV	33.3	45.9	54.3	64.7	79.8	97.0
Rapariegos	Log-Normal	31.2	39.9	45.4	52.2	61.8	72.6
Segovia	GEV	28.2	34.4	38.0	42.1	47.3	52.1
Satelital	GEV	35.8	45.3	51.1	57.8	66.7	75.5

3.4.2. Estimación de intensidad

Tras determinar las precipitaciones máximas diarias de cada estación para los diferentes periodos de retorno, se estimará la intensidad de la precipitación con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, para efectos prácticos, el tiempo de concentración de la cuenca se aproximará de 31.8 a 32 horas.

La intensidad será determinada mediante la fórmula propuesta en la Instrucción de Drenaje Superficial de Carreteras (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011b) que se presenta a continuación:

$$I_t = \frac{P_d}{24} \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1-t^{0.1}}}{28^{0.1}-1}} \quad [3]$$

Donde:

I_t : Intensidad media correspondiente a la duración t (mm/h)

P_d : Precipitación diaria (mm)

t : Duración de la precipitación, tiempo de concentración en este caso (horas)

$\frac{I_1}{I_d}$: Coeficiente de torrencialidad.

Se obtiene el coeficiente de torrencialidad para la cuenca correspondiendo al valor de 10 del Mapa índice Torrencialidad. A continuación, se calcula la intensidad (I) para cada estación con una duración de 32 horas, para la precipitación con periodo de retorno de 500 años. Los resultados obtenidos, se presentan en la **Tabla 3.8**:

Tabla 3.8 Intensidad para evento de duración 32 horas con T=500 años.

Estación	I (mm/hr) T=500
Ávila	2.3
Cantimpalos	3.49
Embalse de Pontón Alto	2.59

Estación	I (mm/hr) T=500
Matapozuelos	2.48
Mingorria	2.83
Navas de Oro	1.87
Navas de San Antonio	3.62
Rapariegos	2.71
Segovia	1.95
Satelital	2.82

3.5. Umbral de escorrentía y valor Curva Número

El exceso de precipitación, o precipitación efectiva, es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano (Chow, 1994). De manera gráfica, la diferencia entre el hietograma correspondiente a la lluvia total y el hietograma de exceso de precipitación se conoce como abstracciones o pérdidas, siendo un concepto clave para el estudio de relaciones lluvia-escorrentía. Un valor de precipitación menor a la abstracción o umbral de escorrentía (P_0), no producirá escorrentía directa.

Existen diferentes modelos para determinar las abstracciones, entre ellos el método SCS, desarrollado por el Soil Conservation Service, en el cual la abstracción o umbral de escorrentía P_0 es un valor que depende de: el uso del suelo, la pendiente, el tipo de suelo y la cantidad de humedad de este previo a la precipitación. La relación entre la precipitación efectiva y el umbral de escorrentía se presenta a en la fórmula [4]:

$$P_e = \frac{P - P_0}{P - P_0 + 0.8S} \quad [4]$$

Donde:

P_e : Precipitación efectiva (mm)

P : Precipitación total registrada (mm)

P_0 : Umbral de escorrentía (mm)

S : Retención potencial máxima de la cuenca (mm)

El valor de S corresponde a la retención potencial máxima de la cuenca, desarrollándose la siguiente relación empírica, para obtenerla en base al umbral de escorrentía:

$$P_e = 0.2 * S \quad [5]$$

Se puede reemplazar la ecuación [5] en [4] y determinar la precipitación efectiva en base al umbral de escorrentía. El SCS representó gráficos de los valores de P y Pe, para diferentes cuencas, como las que se presentan en la **Tabla 3.8**:

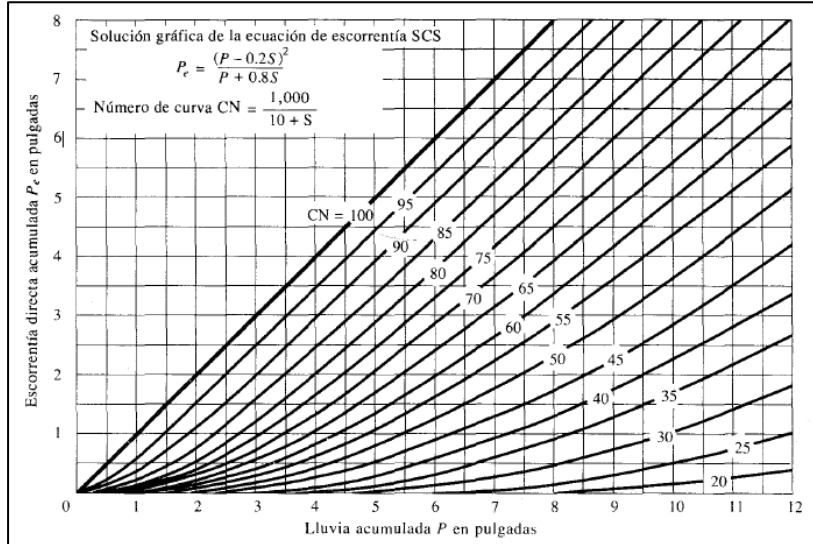


Figura 3.8 Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS. Tomado de Hidrología Aplicada (Chow, 1994).

Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional, el denominado Valor Curva Número (CN), el cual varía entre 0 y 100. Correspondiendo el valor de 100 para superficies impermeables y superficies de agua, mientras que para otras superficies valores menores a 100. La SCS determinó tablas con diferentes valores de CN, según la descripción del uso de la tierra y el grupo hidrológico para la determinación del valor para diferentes cuencas. En caso de trabajar con cuencas compuestas se pueden ponderar los valores. La relación que se visualiza en la **Figura 3.8**, entre el valor CN y S, transformada a sistema métrico se presenta en la fórmula [5]:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad [6]$$

Empleando la relación de la ecuación [5] en la ecuación [6], se puede obtener una relación entre CN y P0, finalmente despejando para P0 se obtiene la ecuación [7]:

$$P0 = \frac{5080}{CN} - 50.8 \quad [7]$$

Mediante la ecuación [7], se obtiene una relación directa entre el umbral de escorrentía y el valor curva número.

En el caso de España peninsular, existe un Mapa del umbral de escorrentía (mm), el cual se encuentra publicado en capa SIG, disponible en la página web del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico de España (MITECO). Este mapa realizado por el CEDEX en colaboración con la Universidad de León. El mapa fue confeccionado considerando lo siguiente: Grupo Hidrológico del suelo, uso de suelo, según la información contenida en el Proyecto CORINE LAND COVER (CLC2 2006) y la pendiente del terreno, obtenida de operaciones SIG a partir del MDT con resolución 500x500 m, distinguiendo pendientes menores y mayores al 3% (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011a).

Utilizando la capa de umbral de escorrentía, mediante operaciones en QGis, se sustraen las zonas correspondientes a las subcuencas en estudio. Luego, aplicando la fórmula [6] mediante la herramienta Calculadora raster de Qgis, se obtienen los mapas de umbral de escorrentía y curva número para las subcuencas en estudio. Los mapas resultantes se presentan en la **Figura 3.9** y **Figura 3.10**:

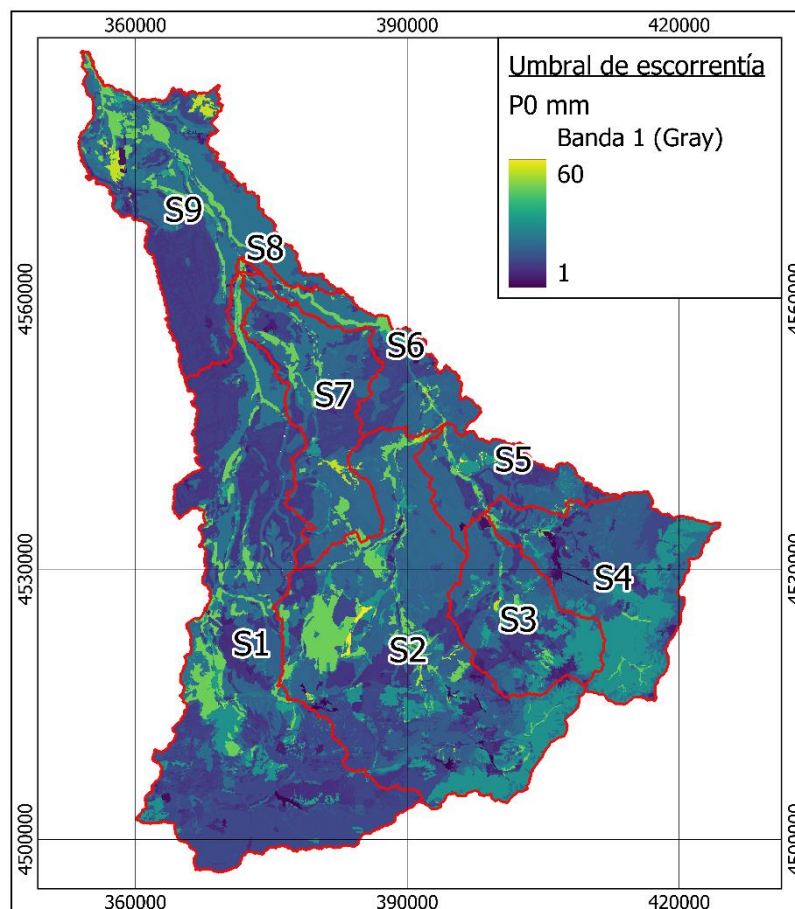


Figura 3.9 Valores Umbral de escorrentía en cuenca Eresma.

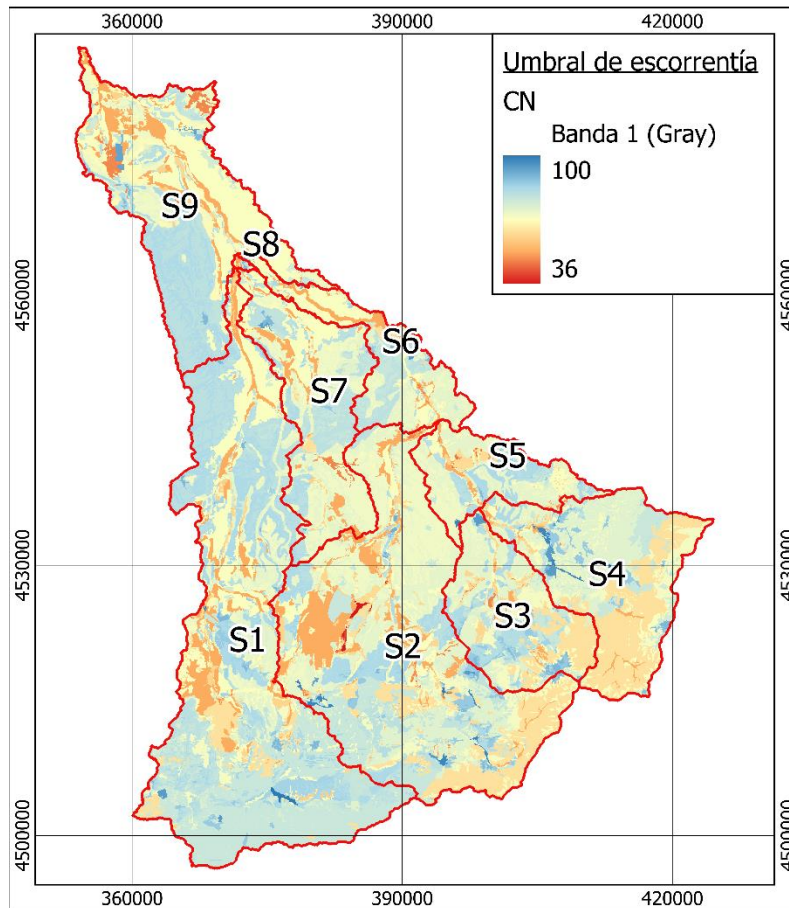


Figura 3.10 Valores Curva Numero en cuenca Eresma.

Determinados los valores de P0 y CN en las subcuencas de estudio, se utiliza la herramienta de QGis Estadística ráster, obteniendo los valores promedios del umbral de escorrentía y curva número en cada subcuenca, estos valores se presentan en la **Tabla 3.9**:

Tabla 3.9 Valores de P0 y CN promedio en las subcuencas.

Subcuenca	P0 (mm)	CN
S1	18.2	74.9
S2	22.6	70.6
S3	20.5	72.3
S4	22.1	70.6
S5	19.6	73.0
S6	21.1	71.6
S7	20.3	72.5
S8	24.4	70.2
S9	21.3	72.0

3.6. Polígonos de Thiessen

La distribución de la precipitación varía espacialmente, existiendo diferentes técnicas y modelos con los cuales puede ser estimada. Usando como base datos pluviométricos y la ubicación de las estaciones, existen técnicas como: los polígonos de Thiessen, método del cuadrado de la distancia recíproca, isoyetas y el Kriging, el cual se puede apoyar en datos topográficos.

En el presente trabajo, considerando la buena distribución de estaciones que se posee en la cuenca y los métodos posibles para incluir precipitación en el modelo Hec-HMS, se escogen los polígonos de Thiessen.

El método polígonos de Thiessen, establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra el pluviómetro más cercano, luego el valor de precipitación registrado por un pluviómetro se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes (Chow, 1994). Si existen J pluviómetros y área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos es A_j y P_j es la lluvia registrada del pluviómetro j -ésimo, la precipitación promedio para la cuenca sobre el área se presenta en la ecuación [8]:

$$P = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^J P_j A_j \quad [8]$$

Siendo la sumatoria de las áreas, el área total de la cuenca. Se debe considerar que el método de Thiessen no tiene en cuenta en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia.

Se aplica la metodología de los polígonos de Thiessen, mediante la herramienta QGis Polígonos Voronoi, la cual, ingresando una capa con la ubicación de las estaciones escogidas previamente, genera el polígono de Voronoi, con el área de influencia de cada estación. Para determinar la influencia de cada estación sobre cada subcuenca, mediante la herramienta de Geoproceso Intersección de QGis, se intersectan los polígonos de Thiessen con las subcuencas, se presenta el resultado en la **Figura 3.11**:

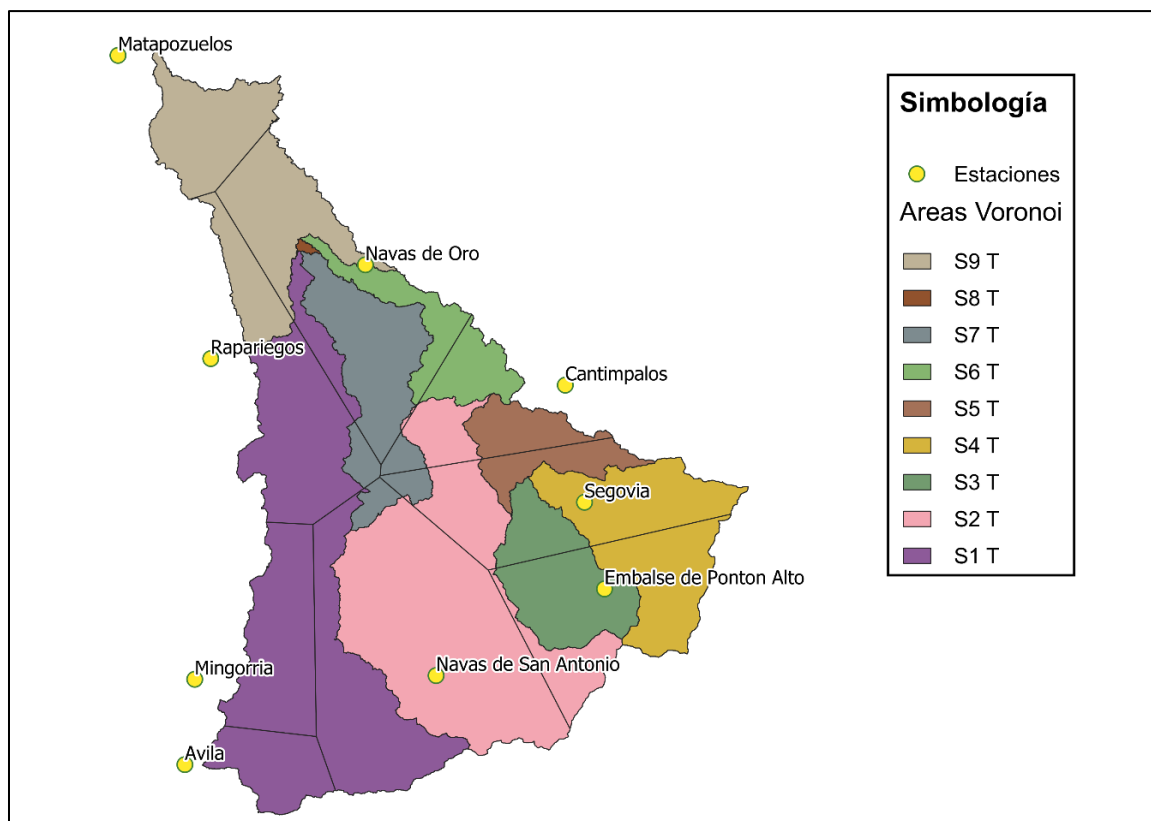


Figura 3.11 Áreas de influencia de estaciones sobre subcuencas.

Para determinar la influencia de cada estación sobre cada subcuenca, se calcula el área de influencia sobre el área total de la subcuenca, el resultado se presenta en la **Tabla 3.10**:

Tabla 3.10 Porcentaje de área de influencia sobre subcuencas.

Estación	Área de influencia sobre subcuenca (%)								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Ávila	12.8								
Cantimpalos		7.8			51.7	46.5	6.5		
Embalse de Pontón Alto		9.7	69.4	47.6					
Matapozuelos									39.8
Mingorría	24.5								
Navas de Oro	5.1	0.1				53.5	71.6	100	41.2
Navas de San Antonio	30.2	70.2					7.5		
Rapariegos	27.4						7.9		18.9
Segovia		12.1	30.6	52.4	48.3		6.5		
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.7. Confección modelo hidrológico HEC-HMS

El software Hec-HMS fue diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en sistemas de drenajes dendríticos, en un amplio rango de áreas

geográficas con una gran amplitud de rango de problemas. Incluye análisis de los procedimientos tradicionales usados en hidrología, como infiltración, hidrogramas unitarios, rastreo de crecidas, para los cuales posee variados métodos de cálculos, gracias a esto es una herramienta flexible, que puede adaptarse al usuario, la zona en estudio y la información disponible para el estudio. Un modelo hidrológico en Hec-HMS requiere de 3 componentes: modelo de cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control. Posterior al ingreso de las componentes se realiza la simulación del modelo.

3.7.1. Modelo de la cuenca

El modelo de la cuenca comprende los diferentes elementos hidrológicos que interactúan en la misma, cada uno forma parte de los cálculos del modelo y poseen parámetros propios. Los elementos hidrológicos pueden ser delimitados por Hec-HMS, mediante el Menu GIS, al incluir un MDT, al cual se rellena las celdas vacías, luego se establecen los patrones de drenaje, el punto de desfogue y la identificación de los cauces. Posteriormente, se utiliza la herramienta delinear elementos, obteniendo las subcuencas y los elementos hidrológicos que se presentan la **Figura 3.12**:

3.12:

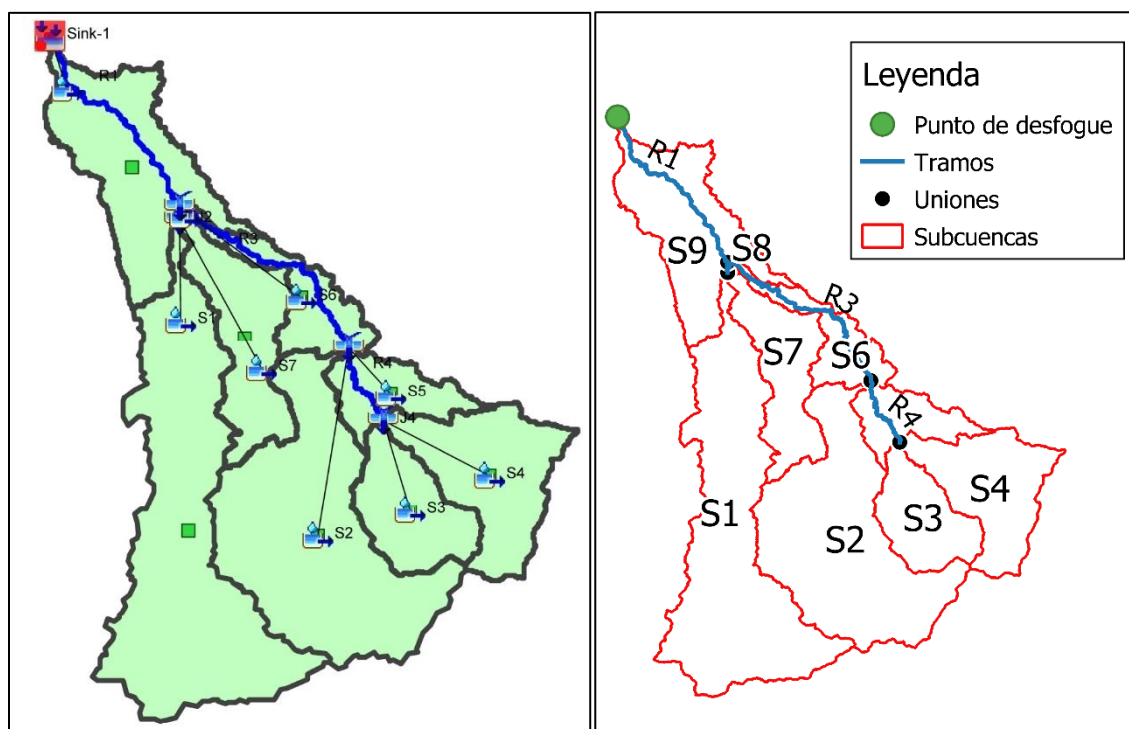


Figura 3.12 Modelo Hec-hms con elementos hidrológicos.

En la **Figura 3.13**, se visualizan los elementos hidrológicos del modelo Hec-HMS:



Figura 3.13 Iconos elementos hidrológicos en Hec-HMS.

El primero consiste en la subcuenca (*subbasin*), las cuales se obtienen de la división de la cuenca en estudio. Entre sus principales parámetros se encuentra el área, y los procesos hidrológicos corresponden al método de pérdidas y el método de transformación precipitación-escorrentía. El segundo elemento es el tramo (*reach*), el cual propaga el hidrograma resultante de la subcuenca, entre sus principales procesos se encuentra el método de tránsito de crecidas (*routing*). El tercer elemento corresponde a la unión (*junction*), en el cual se suman hidrogramas de diferentes elementos. Finalmente, el cuarto elemento sumidero (*sink*) se usa para presentar el punto de desfogue de la cuenca y cuantificar el hidrograma. En la **Figura 3.11**, se listan los elementos constituyentes del modelo:

Tabla 3.11 Elementos hidrológicos constituyentes de modelo de cuenca.

Nombre de elemento	Tipo
S4	Subcuenca
S3	Subcuenca
J4	Unión
R4	Tramo
S2	Subcuenca
S5	Subcuenca
J3	Unión
R3	Tramo
S1	Subcuenca
S7	Subcuenca
J2	Unión
R2	Tramo
S6	Subcuenca
S8	Subcuenca
J1	Unión
R1	Tramo
S9	Subcuenca
Sink-1	Sumidero

La interconexión de los elementos fue realizada por Hec-HMS. Las subcuencas

provenientes del este, S3 y S4 se unen en J4 y mediante el tramo R4 transitan hasta la unión J3. En J3 se unen la subcuenca S2, S5 y el tramo R4. Posteriormente, J3 transita mediante el tramo R4 hasta la unión J1. Las subcuencas del oeste, S1 y S7 se juntan en la unión J2, la cual mediante el tramo R2 transita hasta la unión J1, en donde se junta con la subcuenca S8 y el tramo R4. El hidrograma en la unión J1, transita en el tramo R1 hasta el sumidero, en donde se une con la subcuenca aguas abajo, S9.

3.7.2. Métodos y parámetros utilizados en elementos hidrológicos

A. Subcuencas

El área de las subcuencas fue determinada mediante Hec-HMS 4.10, los valores estimados se encuentran en la **Tabla 3.2**.

En consideración de los parámetros que se disponen, para la metodología de pérdidas en las subcuencas, se aplicó el método *SCS Curve Number*, utilizando los valores de umbral de escorrentía (P0) y Curva Número (CN) presentados en la **Tabla 3.9**, dada las extensiones de las subcuencas y que las condiciones del suelo ya se consideran en el ráster correspondiente al umbral de escorrentía, se considera como área impermeable 0%.

El método de transformación utilizado fue *SCS Unit Hydrograph*, el cual requiere el tiempo de retardo (min), los valores se presentaron previamente en la **Tabla 3.3**, en formato de horas, por lo que son transformados desde horas a minutos e ingresados al modelo. Cabe mencionar que los valores de CN serán calibrados en el modelo.

B. Tramos

La longitud, pendiente y desnivel de los tramos fue determinada mediante la herramienta de caracterización de tramos de Hec-HMS, obteniendo los valores presentados en la **Tabla 3.12**:

Tabla 3.12 Caracterización de tramos.

Tramo	Longitud (km)	Desnivel (m)	Pendiente (m)
R1	37.4	43	0.115
R2	2.6	8	0.302
R3	42.1	105	0.249
R4	16.3	33	0.203

El método de tránsito de crecida utilizado fue el método de Muskingum, el cual se configura mediante dos parámetros, X y K. El parámetro K corresponde al tiempo de tránsito de la de la onda del flujo a través del cauce, retardando el hidrograma en el tiempo, mientras que X corresponde a un adimensional que atenúa el hidrograma, teniendo valores entre 0 y 0.5, encontrándose la máxima atenuación para valores cercanos a 0 y no atenuando la crecida para el valor de 0.5.

Para la determinación de los parámetros del método X y K, se utilizó la metodología Estimación de parámetros para cuencas sin caudales medidos, propuesta en el Manual técnico de referencia de Hec-HMS (US Army Corps of Engineers, 2022b). Determinando la velocidad de propagación de onda, mediante caudales correspondientes a las crecidas de 500 y años 100 años en los tramos, obtenidos a partir de CAUMAX, anchos de inundación del Mapa de peligrosidad por inundación fluvial con periodos de retorno de 500 y 100 años del MITECO.

Con la velocidad de onda determinada, se estima K en función de la longitud del cauce y el parámetro X con información morfológica del cauce. Cabe mencionar, que los valores de X serán calibrados en el modelo.

C. Uniones y sumideros

Las uniones y sumideros no presentan parámetros para configurar, la conexión entre los diferentes elementos hidrológicos se realiza mediante la herramienta delinear elementos de Hec-HMS, posteriormente, se revisa manualmente.

3.7.3. Modelo Meteorológico

Mediante el modelo meteorológico se introducen las precipitaciones y los datos de caudales conocidos al modelo hidrológico. Al realizar el segundo modelo con datos

de teledetección, este será el único componente en el que se realizarán cambios.

Para la cuenca en estudio, se configuran la precipitación de las 9 estaciones que se incluirán, escogiendo el intervalo de tiempo para el ingreso de información, en este caso 30 minutos, luego se ingresa la fecha y hora del evento. El evento poseerá la misma fecha de inicio y una duración de 32 horas para todas las estaciones. Se incluyen en las estaciones valor de la intensidad para cada estación según la **Tabla 3.8**.

Posteriormente, se escoge el método mediante el cual se distribuye la precipitación en la cuenca, en este caso se escoge “*Gage Weights*”, siendo el método que mejor representa los resultados obtenidos de los polígonos de Thiessen. Se configura seleccionando las estaciones que presentan influencia en cada subcuenca y se indica el peso que tiene sobre la cantidad de precipitación en la misma. Los pesos utilizados en las subcuencas corresponden a los presentados en la **Tabla 3.10**.

3.7.4. Especificaciones de control

En las especificaciones de control se establece la duración de la modelación y los intervalos en los cuales se realizarán los cálculos. Para la cuenca en estudio, se escogió un tiempo para el cual se modela el pico de la crecida y la misma se encuentre desaguando, el tiempo de modelación escogido fue de 4 días, es decir 96 horas, aproximadamente 3 veces el tiempo de concentración de la cuenca. Los cálculos en la cuenca se realizan cada 15 minutos, siendo un valor al de ingreso de precipitación. Con la información presentada previamente se puede realizar la simulación del modelo

3.8. Dato de caudal para evento con periodo de retorno de 500 años

En consideración del alto periodo de retorno para el cual se determina la crecida, se calibrará el modelo con un caudal estimado previamente. Se utiliza el caudal calculado en el Mapa de caudales máximos en régimen natural (CAUMAX). Siendo un estudio realizado por el CEDEX, cuyo objetivo es calcular los caudales máximos con periodo de retorno entre 2 y 500 años e interpolarlos para diferentes cauces, obteniendo una herramienta de consulta para los caudales máximos.

La herramienta puede ser descargada desde la página de MITECO o visualizar la información mediante un visor online. Se utiliza la versión de CAUMAX del año 2014. Para la cuenca Eresma el caudal máximo, obtenido aguas arriba de la confluencia con el río Adaja con un periodo de retorno de 500 años, corresponde a un valor de 602 m³/s. Este valor será agregado al modelo meteorológico mediante el formato *Discharge gages* y se usará para calibrar parámetros.

3.9. Calibración

Con el modelo ya simulado y el caudal para calibrar estimado, se escogen los dos parámetros en el modelo para los cuales se posee mayor incertidumbre.

El primero en escogerse es el valor promedio de la CN para las subcuencas, el cual fue estimado en base a la ecuación [7], utilizando como supuesto previamente la ecuación [5]. La razón es que es un parámetro que posee variabilidad espacial y temporal, debido a los cambios en el uso de suelo, además que fue estimado indirectamente en base a otro parámetro, en este caso, el umbral de escorrentía.

El segundo parámetro en calibrarse es valor X del método de Muskingum para los 4 tramos, del cual la magnitud del caudal resultante es sensible. Este parámetro atenúa la crecida y la determinación fue mediante escasa información, de diferentes fuentes y sin aforos en terreno.

La calibración se efectúa mediante la herramienta *Optimization Trial manager* de Hec-HMS. En la cual se seleccionan los elementos de la modelación que se calibrarán, en este caso, será la modelación en todo su intervalo. Posteriormente, se escoge los parámetros a calibrar, en este caso, los valores CN de las 9 subcuencas y el valor X del método de Muskingum de 4 tramos, siendo en total 13 parámetros.

Luego, se configura la tolerancia aceptada 0.05, la cantidad de iteraciones y se define el objetivo a calibrar, en este caso el caudal pico del hidrograma en el sumidero. En la **Tabla 3.13** se presenta los resultados de la calibración:

Tabla 3.13 Resultado calibración de parámetros.

Elemento	Parámetro	Valor inicial	Valor Optimizado
S1	SCS Curve Number - Curve Number	65.631	65.36
S2	SCS Curve Number - Curve Number	62.759	60.817
S3	SCS Curve Number - Curve Number	57.654	62.145
S4	SCS Curve Number - Curve Number	57.654	62.673
S5	SCS Curve Number - Curve Number	57.204	60.393
S6	SCS Curve Number - Curve Number	61.718	60.045
S7	SCS Curve Number - Curve Number	63.871	59.468
S8	SCS Curve Number - Curve Number	61.255	59.263
S9	SCS Curve Number - Curve Number	64.679	60.395
R1	Muskingum - x	0.27655	0.2702
R2	Muskingum - x	0.26025	0.2492
R3	Muskingum - x	0.22613	0.21367
R4	Muskingum - x	0.22613	0.21367

Finalmente, configurando el modelo con los parámetros optimizados, se obtiene un caudal en el sumidero de 603.4 m³/s, correspondiendo a una diferencia de 0.23% respecto al caudal obtenido de CAUMAX. Se aclara que existe una estación de aforo en la cuenca, cerca del punto de desfogue denominada Rio Eresma en Olmedo (Indicativo 2048), la cual no se encuentra activa desde el año 2012, no ocupándose debido a que no tiene datos en el intervalo de estudio.

3.10. Modelo hidrológico con datos de precipitación de teledetección

Se utiliza como base el modelo optimizado previamente, modificando el modelo meteorológico, cambiando la información de las 9 estaciones, por una estación única para la cuenca, denominada Satelital, con un evento de la misma duración y una intensidad para el periodo de retorno de 500 años de 2.82 mm/hr.

En el modelo meteorológico también se modifica la distribución de precipitación desde *Gage Weights* a Hietograma especificado, asignando como única estación

la estación satelital y se inicia la simulación del modelo.

4. RESULTADOS

En el presente capítulo, se comparan los resultados obtenidos de las series de datos y los modelos hidrológicos, además, se realiza una comparación de los valores estadísticos de las series y los valores calculados para las precipitaciones con diferentes periodos de retorno. Se continúa con la comparación de los valores de caudales pico en los diferentes elementos hidrológicos. Finalmente, se comparan los hidrogramas de las crecidas en diferentes elementos y el punto de desfogue de la cuenca. En adelante, al modelo conformado con datos de precipitación obtenidos de estaciones de pluviómetros, se denomina modelo de estaciones y al modelo con datos de precipitación obtenidos mediante teledetección, modelo satelital.

4.1. Comportamiento estadístico datos satelitales

En base a los coeficientes estadísticos presentados en la Tabla 3.6, se confecciona la **Figura 4.1**, el cual da cuenta de los estadísticos de las estaciones, se aclara que (*) indica estaciones que no se utilizaron en el modelo y (**) corresponde a la estación generada con datos de teledetección:

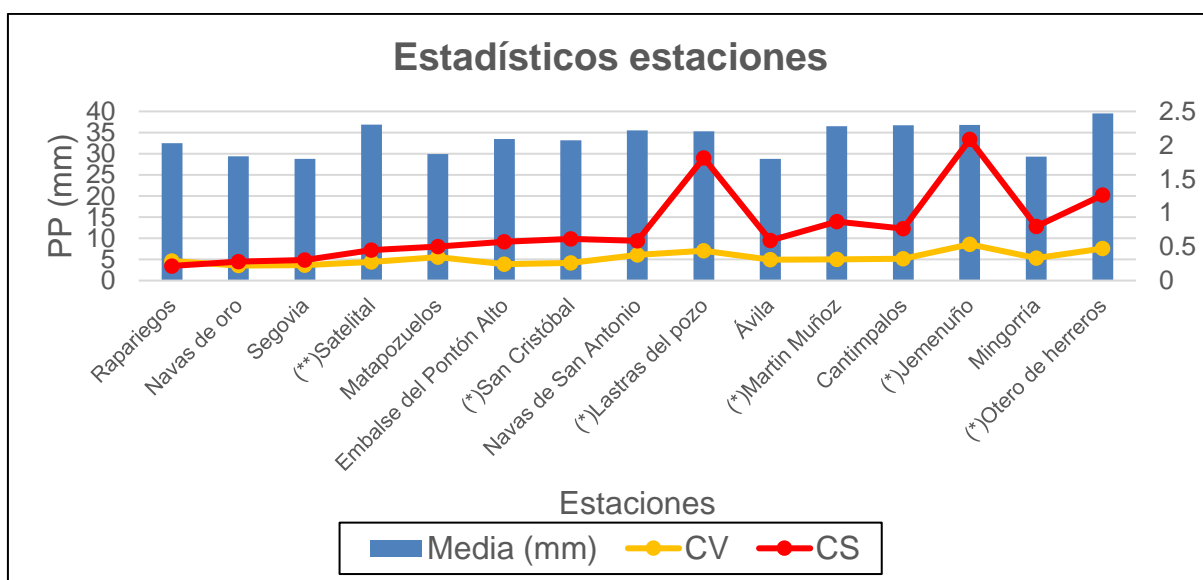


Figura 4.1 Gráfico valores estadísticos estaciones.

Del gráfico se da cuenta que la precipitación obtenida mediante teledetección, en promedio es de las más altas registradas en la cuenca, con un valor de 36.9 mm,

mientras que el promedio de las estaciones del modelo de datos pluviométricos es de 31.6 mm. Respecto a los coeficientes de varianza y sesgo, para ambos consta de valores bajos. El estadístico del CV es de valor 0.276, mientras que el promedio de las estaciones utilizadas en el modelo es 0.297, indicando estadísticamente una menor dispersión de los valores en relación con el promedio, mientras que el coeficiente de sesgo es de valor 0.452, siendo el promedio de las estaciones pluviométricas 0.513, teniendo también un valor menor al promedio.

En la **Figura 4.2**, se presenta la información de la **Tabla 3.7**, en un gráfico de líneas, en el cual se observa la precipitación para diferentes periodos de retorno obtenidos para cada estación (el eje horizontal se encuentra en escala logarítmica):

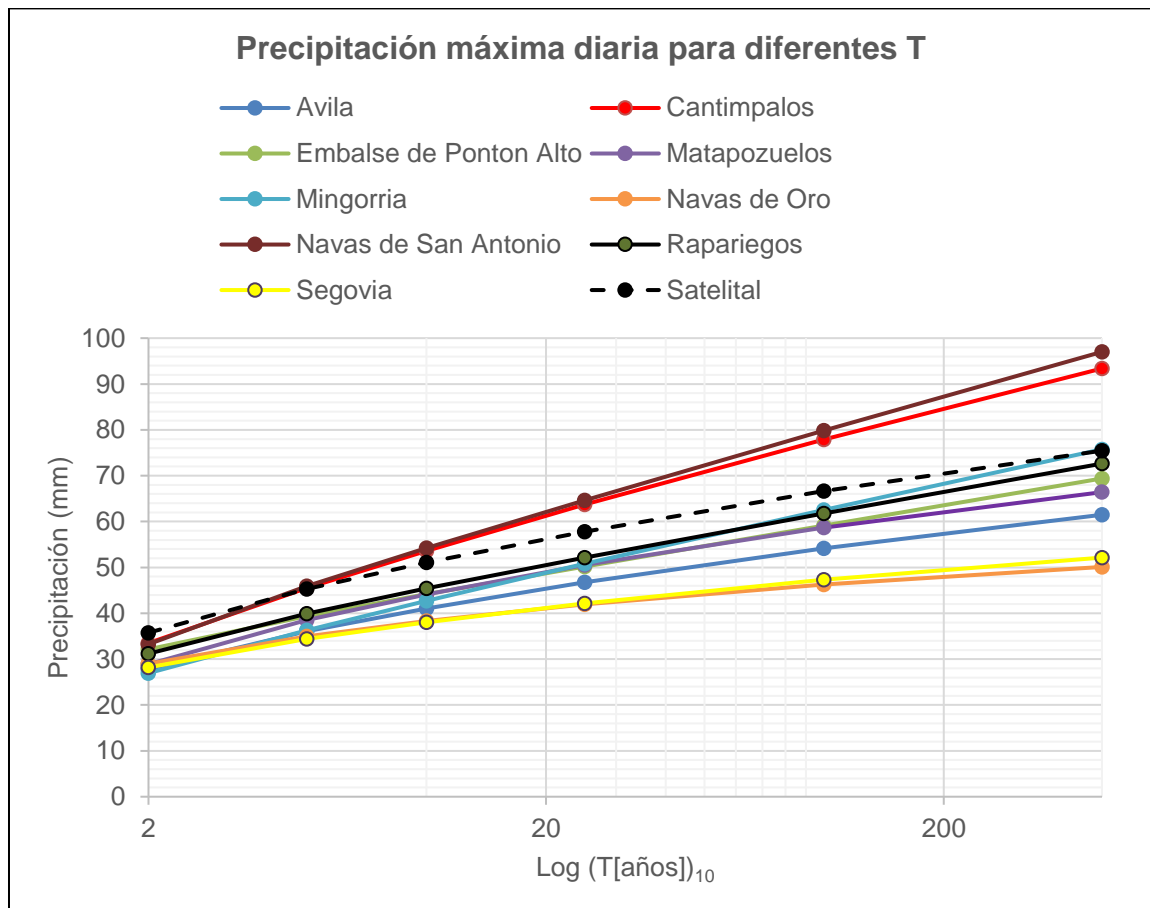


Figura 4.2 Gráfico de PMD para para los diferentes periodos de retorno.

Al comparar la precipitación obtenida mediante teledetección, el valor para el T=2 años, se visualiza que el valor es superior al de los pluviómetros (debido al mayor promedio en los datos), pero entre los periodos de retorno 5 hasta 100 años, ocupa el tercer lugar, mientras que, para el periodo de retorno de 500 años, ocupa el cuarto. Encontrándose para el T=500 ligeramente por sobre el promedio de las

estaciones pluviométricas, con un valor de PMD de 75.5 mm, mientras que el promedio de las estaciones pluviométricas es de 70.9 mm.

4.2. Caudales pico de los modelos hidrológicos

En la **Tabla 4.1** se comparan los caudales picos de los hidrogramas entre los distintos elementos hidrológicos.

Tabla 4.1 Comparación picos de hidrogramas para los elementos.

Elemento	Q pico modelo estaciones (m ³ /s)	Q pico modelo satelital (m ³ /s)	Diferencia estaciones - satelital (m ³ /s)	Diferencia (%)
J1	587.5	543.6	43.9	7.5%
J2	321.7	332.4	-10.7	-3.3%
J3	356.5	310.9	45.6	12.8%
J4	102.4	153	-50.6	-49.4%
R1	583	539.1	43.9	7.5%
R2	321.1	331.8	-10.7	-3.3%
R3	346.8	302.3	44.5	12.8%
R4	98.8	148.2	-49.4	-50.0%
S1	281.7	263.9	17.8	6.3%
S2	298.3	221	77.3	25.9%
S3	52.3	71.3	-19	-36.3%
S4	54.4	86.9	-32.5	-59.7%
S5	28.4	30	-1.6	-5.6%
S6	38.6	44.4	-5.8	-15.0%
S7	40.1	68.6	-28.5	-71.1%
S8	0.4	0.9	-0.5	-125.0%
S9	63.4	100.1	-36.7	-57.9%
Sumidero	603.4	572.2	31.2	5.2%

El sumidero se encuentra en el punto de desfogue de la cuenca, lugar donde se encuentran los mayores caudales y donde se calibraron los modelos. El caudal obtenido de CAUMAX para ese punto es de 602 m³/s, el del modelo con estaciones pluviométricas 603.4 m³/s y el modelo con datos satelitales 572.2 m³/s siendo un valor 4.9% menor que el valor con el que se ajustó el modelo.

Respecto a los caudales simulados por las subcuencas S1 y S2, ubicadas en la zona suroeste de la cuenca, se obtuvieron mayores caudales en el modelo de estaciones pluviométricas. Mientras que, en las demás subcuencas, el modelo con datos de teledetección tuvo mayores caudales pico. En la **Tabla 4.2** se muestra la

suma de caudales pico en los elementos agrupados del modelo:

Tabla 4.2 Suma de caudales pico en la salida de elementos.

Elemento	Suma Q pico modelo estaciones (m ³ /s)	Suma Q pico de modelo satelital (m ³ /s)	Diferencia estaciones-satelital (m ³ /s)	Diferencia (%)
Uniones	1368.1	1339.9	28.2	2.1%
Tramos	1349.7	1321.4	28.3	2.1%
Subcuencas	857.6	887.1	-29.5	-3.4%
Sumidero	603.4	572.2	31.2	5.2%

Se observa que la suma de valores pico en las subcuencas es mayor para el modelo con datos satelitales que para el de estaciones pluviométricas, pero que para el caso de las uniones y tramos esta relación se invierte. Finalmente, en la salida de la cuenca se observa un mayor caudal en el modelo con estaciones pluviométricas.

4.3. Hidrogramas modelos hidrológicos

Se comparan los hidrogramas de ambas modelaciones en diferentes elementos hidrológicos. En la **Figura 4.3**, se presentan los hidrogramas resultantes en el punto de desfogue de la cuenca (correspondiente al sumidero):

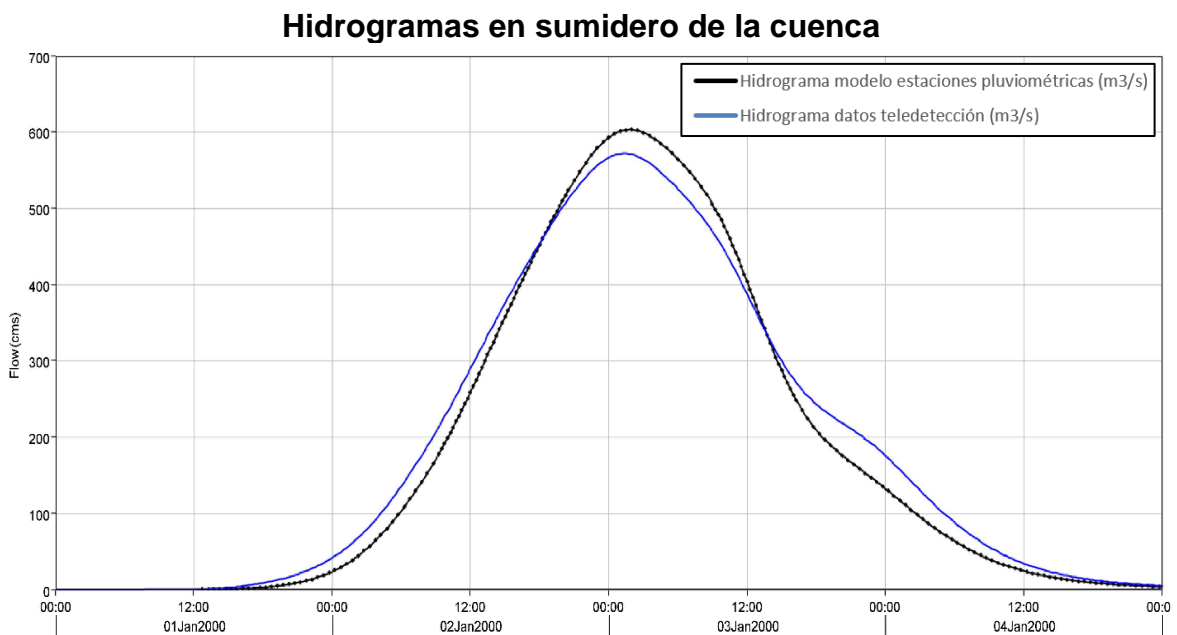


Figura 4.3 Hidrogramas resultantes de ambos modelos.

Se visualiza que el hidrograma del modelo confeccionado con estaciones

pluviométricas posee un mayor caudal pico. El momento en que se alcanzan los puntos máximos es próximo para ambos modelos. Se aprecian ligeras diferencias en la forma del hidrograma, teniendo el modelo satelital valores mayores de caudal, previa y posteriormente al pico del hidrograma, siendo un indicio de una atenuación del hidrograma.

En la **Figura 4.4**, se presenta la tabla resumen que genera Hec-HMS respecto a la modelación con datos satelitales (*Computed Results*), comparada al modelo con estaciones pluviométricas (*Observed Flow*).

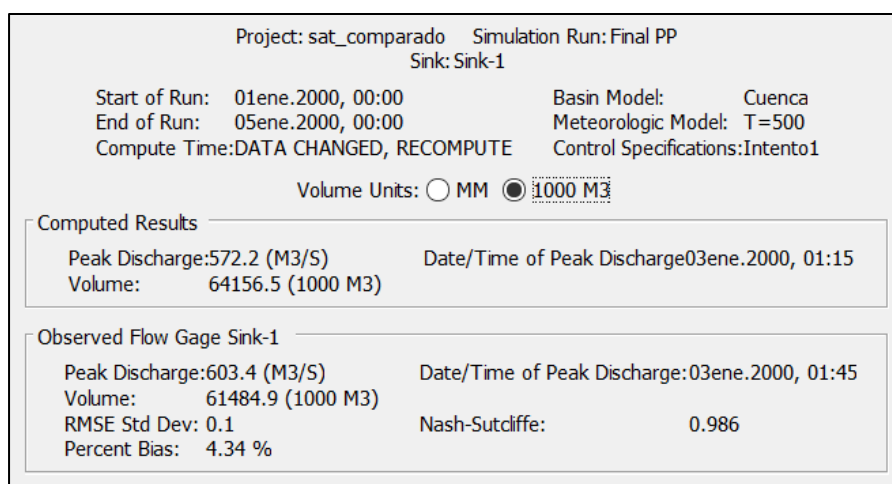


Figura 4.4 Resumen comparativo entre modelos de Hec-HMS.

Se observa que el volumen del hidrograma de datos satelitales (64.156 1000 m3), es mayor que el volumen del modelo de estaciones pluviométricas (61.484 1000 m3). El caudal pico se encuentra desfasado en media hora entre las modelaciones, alcanzando el valor máximo el modelo con datos satelitales primero. El coeficiente *Nash–Sutcliffe* es utilizado como criterio para evaluar la capacidad de reproducción del modelo hidrológico, siendo el valor de 1 un modelo perfecto y un valor por sobre 0.8 un excelente valor, para el resultado entre modelos se obtuvo 0.986. *Percent BIAS* mide la tendencia promedio de simular valores mayores menores a los observados, indicando un valor positivo una tendencia a sobreestimación y uno negativo subestimación, el valor 4.34% es concordante con la mayor cantidad de volumen en el hidrograma de datos satelitales.

En la **Figura 4.5**, se visualizan los hidrogramas para ambos modelos en el tramo 4 (*Reach 4*) y tramo 3 (*Reach 3*), este último se ubica en la subcuenca S6 y el tramo

4 se ubica en la subcuenca S5, a la cual se conectan las subcuenas S3 y S4.

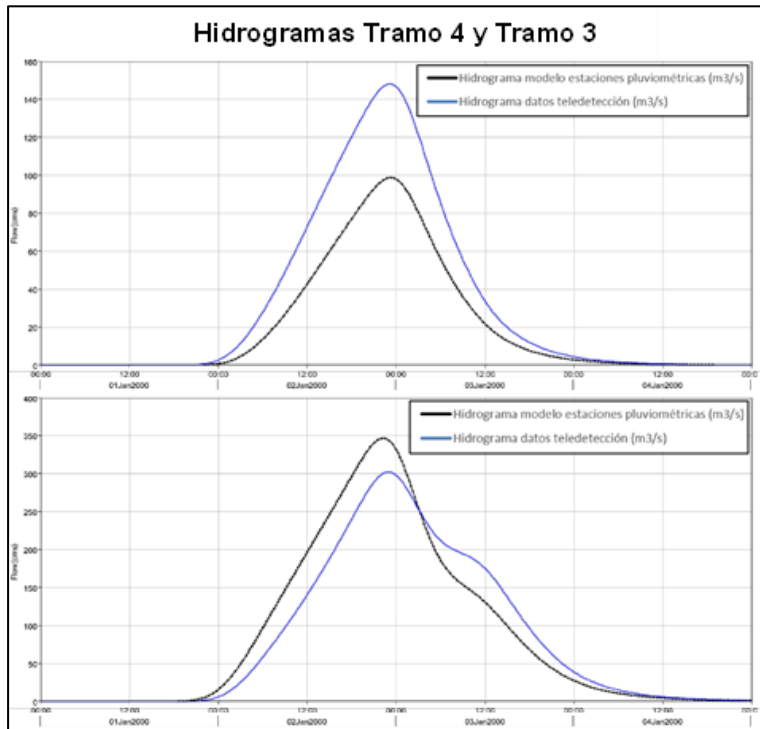


Figura 4.5 Hidrogramas tramo 4 y tramo 3.

En la **Figura 4.6**, se visualizan los hidrogramas para ambos modelos en el tramo 2 (*Reach 2*) y tramo 1 (*Reach 1*), el tramo 1 es el tramo ubicado más aguas abajo de la cuenca, en la subcuenca S9 y el tramo 2 el tramo que se ubica en la subcuenca S8, al cual se conectan las subcuenas S1 y S2.

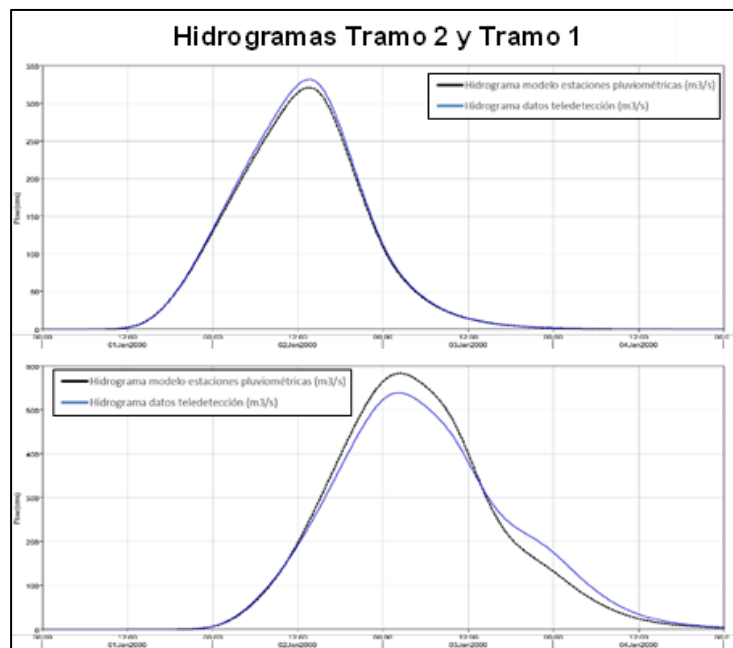


Figura 4.6 Hidrograma tramo 2 y tramo 1.

Se describirán los hidrogramas desde aguas arriba a aguas abajo. En el tramo 4, el modelo de datos satelitales posee un pico y caudales más altos que el de modelos de estaciones pluviométricas. En el tramo 3, el modelo con estaciones pluviométricas posee valores mayores y los hidrogramas poseen formas levemente diferentes, esto debido a la mayor cantidad de caudales en la subcuenca S2 para el modelo de estaciones pluviométricas, se debe considerar que este tramo ya se ve influenciado del tramo 4 y aun así el modelo con datos de estaciones posee mayores caudales. En el tramo 2, se visualizan formas similares en los hidrogramas, pero el hidrograma del modelo satelital posee un caudal levemente superior. Finalmente, en los hidrogramas del tramo 1, se visualiza que el modelo de estaciones pluviométricas posee un mayor caudal pico que el modelo con datos satelitales, siendo un resultado similar al del sumidero de la cuenca.

5. DISCUSIÓN

5.1. Datos de precipitación obtenidos mediante teledetección

Al comparar los valores de precipitación máxima diaria, para diferentes periodos de retorno con las estaciones pluviométricas (**Figura 4.2**), se obtiene que para el periodo de retorno 500 años se calcula un valor cercano al promedio de las estaciones, siendo un buen indicio para el modelo, ya que es periodo de retorno con el cual se realizan las modelaciones en el modelo hidrológico. No obstante, el valor obtenido para el periodo de retorno de 2 años, es mayor al de las estaciones de la cuenca, indicando que posiblemente, para un modelo confeccionado con periodo de retorno de 2 años, se sobreestimaría la precipitación.

Resultados que son coincidentes con Huang et. al, (2013) y Veliz et al., (2018), los cuales concluyeron que el producto TRMM 3B42 V7 sobreestima precipitaciones diarias acumuladas, pero tuvo problemas en detectar lluvia de alta intensidad e identificar la zona de mayor precipitación en una tormenta, esto pudiéndose deber debido a las limitaciones en la resolución. Cabe destacar que el intervalo de información del estudio hidrológico fue de 22 años, siendo menor que los 30 años que se suele recomendar como referencia (OMM, 2017), por lo que con bajas cantidades de años, existe mayor probabilidad de que la muestra de datos no sea representativa de la condición normal, razón por la cual se prescindió de estaciones

que le faltaran series de años o tuvieran coeficientes estadísticos con mucha variabilidad respecto a los demás de la cuenca, en consideración de que la misión TRRM terminó, pero se continúa hoy en día con la misión *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (IMERG), se espera que en algunos años se posea información de precipitación mediante teledetección con una duración mínima de 30 años, pudiéndose estimar normales climáticas.

5.2. Resultados caudales modelo hidrológico

La diferencia entre los caudales pico a la salida de la cuenca entre ambos modelos, fue de 5.2% (603 m³/s modelo con estaciones), siendo menor el caudal del modelo confeccionado con datos de TRMM (572 m³/s), teniendo una diferencia de 4.9% con el caudal de referencia que se utilizó en la calibración obtenido de CAUMAX (602 m³/s). Esto dando cuenta, que para una cuenca de gran área (aproximadamente 2900 km²) se obtuvo un buen resultado. Lo anterior apoyado por el buen resultado del coeficiente de Nash-Sutcliffe (0.986) y Percent BIAS (4.34%).

Pese a que el caudal en el punto de desfogue de la cuenca fue menor en el modelo de datos satelitales, el total de volumen de escorrentía en las subcuencas fue mayor que en el modelo con estaciones pluviométricas. Esto se visualiza en el mayor volumen de caudal que presenta en el hidrograma (**Figura 4.4**). No obstante, en los caudales picos modelados en uniones y tramos los resultados se invierten, modelando mayores caudales en la suma de uniones y tramos para el modelo de estaciones (**Tabla 4.2**). Esto debiéndose a la distribución espacial en la que se encuentran las estaciones con mayor caudal del modelo de teledetección, las cuales se encuentran en su mayoría en las cuencas altas del modelo, estando más afectas al fenómeno de tránsito de crecidas, en los tramos, induciendo la atenuación y traslación de las crecidas.

5.3. Distribución de la precipitación

Un elemento para considerar en la comparación de los modelos es la distribución de la precipitación, debido a que la serie de datos utilizada de la web Giovanni, entrega un valor promedio de precipitación, en el intervalo requerido (en este caso diario), generando un único valor para el área en estudio. Esto en comparación con

el modelo de estaciones pluviométricas, el cual se compone de 9 estaciones, distribuyendo la influencia de estas mediante los polígonos de Thiessen, genera diferencias en los resultados de los modelos y una disminución del desempeño del modelo con datos satelitales. Lo anterior cobra mayor relevancia en cuencas de mayor tamaño, en donde la distribución espacial de la precipitación es de menor uniformidad, razón por la cual se utiliza el coeficiente de uniformidad en fórmulas como el método racional (Temez, 1992). Además, se debe considerar que el uso de un modelo semi-distribuido (en este caso en subcuencas), puede acentuar estas diferencias y, al mismo tiempo, ayudar a detectarlas. En la **Figura 5.1**, se visualiza el mapa de precipitaciones promedio en la zona de estudio, obtenidas del producto TRMM 3B42 V7.

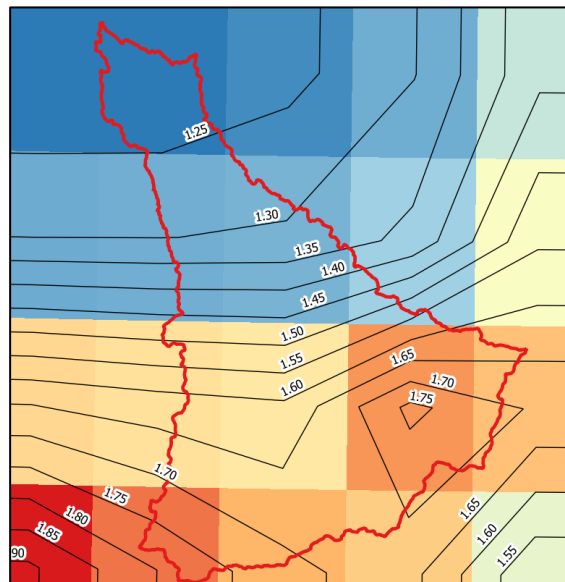


Figura 5.1 Mapa precipitaciones promedio (mm).

En la figura la **Figura 5.1**, se visualiza la capacidad de representar espacialmente la información del producto TRMM 3B42 V7, siendo esta no aprovechada en el presente trabajo. Se estima que a futuro es recomendable aplicar en modelos hidrológicos la información obtenida mediante teledetección en formato ráster, aprovechando las ventajas que tiene esta herramienta por sobre los instrumentos clásicos para medir precipitación. Lo anterior ayudaría a mejorar los resultados en modelación hidrológica, aunque genera nuevas complejidades, como el ajuste de la precipitación a series estadísticas y la determinación de valores para diferentes periodos de retorno, para la aplicación en eventos extremos.

6. CONCLUSIONES

El uso de precipitaciones estimadas mediante teledetección para estudios hidrológicos brinda una fuente continúa espacial y temporalmente de información. En comparación, para el área de estudio, durante el intervalo estudiado, de 18 estaciones de las cuales se poseía información, 4 de ellas tenían datos para menos del 90% de los meses y 4 más se encontraban entre 90 - 95%, mientras que la misión TRMM tenía información durante todo el intervalo.

La precipitación obtenida a partir del producto 3B42 V7, en comparación a la precipitación obtenida mediante estaciones pluviométricas, para la cuenca Eresma, posee coeficientes estadísticos similares, aunque en promedio mayor al de las demás estaciones. Al ajustar la serie de datos a una distribución estadística, se calcula un valor de precipitación con periodo de retorno de 500 años, el cual es un valor cercano al promedio de las estaciones, siendo un buen indicio para el modelo. No obstante, el valor obtenido para el periodo de retorno de 2 años es mayor al de las estaciones de la cuenca, indicando que se sobreestimaría la precipitación, resultados que son coincidentes con Huang et. al, (2013) y Veliz et al., (2018).

El producto 3B42 V7 es grillado, pero fue aplicado en el área de estudio como valor promedio, siendo esta una decisión favorable con el objetivo a realizar, en este caso, la estimación de caudal para un evento extremo con alto periodo de retorno. Debido a la simplicidad, para ajustar la información a una distribución estadística y estimar los valores de precipitación para diferentes periodos de retorno.

Pese a que se utilizó un único dato diario de precipitación para una cuenca de aproximadamente 2900 km², la diferencia entre los caudales pico a la salida de la cuenca, entre ambos modelos, fue de 5.2%, siendo menor el caudal del modelo confeccionado con datos del TRMM, teniendo una diferencia de 4.9% con el caudal de referencia que se utilizó en la calibración. Esto da cuenta de un buen resultado del modelo hidrológico Hec-HMS, con excelentes resultados en el coeficiente de Nash-Sutcliffe (0.986) y Percent BIAS (4.34%). Simulándose de manera correcta un caudal de evento extremo utilizándose precipitación de la misión TRMM, ofreciendo una alternativa de la modelación de caudales extremos en zonas sin o

con escasa información pluviométrica

No obstante, las diferencias expuestas entre ambos modelos, específicamente en los hidrogramas de los diferentes elementos son atribuibles, a la diferencia de distribución de la precipitación, lo que produce diferentes valores de caudales producidos en las subcuencas. Los hidrogramas resultantes de las subcuencas dependiendo de su ubicación, se ven afectados de diferente manera por el rastreo de crecida (*routing*) en los tramos, lo cual genera la diferencia en los picos máximos en el punto de desfogue de la cuenca. En síntesis, se atribuye la diferencia entre modelos a la diferencia de distribución espacial de la precipitación entre modelos y su interacción con el tránsito de la crecida entre los elementos hidrológicos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Asurza Véliz, F. A., Ramos Taipe, C. L., & Lavado Casimiro, W. S. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1996). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- D'souza, G., Barrett, E. C., & Power, C. H. (1990). Satellite rainfall estimation techniques using visible and infrared imagery. *Remote Sensing Reviews*, 4(2), 379-414.
- Huang, Y., Chen, S., Cao, Q., Hong, Y., Wu, B., Huang, M., ... & Yang, X. (2013). Evaluation of version-7 TRMM multi-satellite precipitation analysis product during the Beijing extreme heavy rainfall event of 21 July 2012. *Water*, 6(1), 32-44.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011a. Guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables, 43-82.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011b, Drenaje Superficial de Carreteras.
- Organización Meteorológica Mundial, 2011, Guía de prácticas hidrológicas Volumen II.
- Organización Meteorológica Mundial, 2017, Directrices de la OMM sobre el cálculo de normales climáticas.
- Senent-Aparicio, J., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., Segura-Méndez, F. J., & Pulido-Velazquez, D. (2018). Using multiple monthly water balance models to evaluate gridded precipitation products over peninsular Spain. *Remote Sensing*, 10(6), 922.
- Temez, J. R. (1992). Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. *Revista Digital Del Cedex*, (82), 51.
- US Army Corps of Engineers, 2022a, Hec-HMS User Manual.
- US Army Corps of Engineers, 2022b, pag 131-133, HEC-HMS Technical Reference Manual.

ANEXOS

Anexo 1: Máxima precipitación mensuales y anuales de estaciones (mm)

Ávila	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	190	30	78	233	236	76	0	203	172	56	155	295	295
1999	124	52	47	74	117	160	43	77	135	108	63	129	160
2000	45	8	244	118	257	61	31	26	91	219	147	280	280
2001	299	112	48	14	296	163	262	51	66	237	44	50	299
2002	113	36	237	76	223	47	0	146	171	214	158	102	237
2003	58	376	115	268	132	68	0	298	203	244	192	195	376
2004	27	87	171	69	154	348	5	138	3	238	194	144	348
2005	3	227	32	126	88	99	0	131	182	222	174	76	227
2006	89	85	95	97	99	232	112	60	259	301	155	77	301
2007	64	183	33	146	401	120	10	360	36	143	182	62	401
2008	60	88	113	196	271	188	64	29	236	398	60	111	398
2009	71	52	34	67	86	96	0	32	32	102	68	152	152
2010	85	92	86	85	122	98	74	146	235	83	86	101	235
2011	53	58	121	247	211	51	73	182	2	80	160	51	247
2012	114	46	44	124	122	4	68	64	354	224	108	84	354
2013	56	46	174	96	146	106	32	74	52	148	194	132	194
2014	82	52	76	82	70	84	52	20	86	314	166	122	314
2015	196	104	130	114	64	212	14	74	76	138	76	34	212
2016	146	70	168	350	188	118	146	2	96	188	256	87	350
2017	10	510	56	88	102	20	512	460	0	54	94	94	512
2018	254	156	136	164	144	124	108	2	198	134	78	38	254
2019	96	14	106	102	22	42	10	114	190	180	74	144	190
Máximo	299	510	244	350	401	348	512	460	354	398	256	295	512

Cantimpalos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	89	57	80	116	136	133	7	240	149	67	174	116	240
1999	208	123	98	93	111	125	116	110	105	214	79	89	214
2000	26	29	49	129	195	165	74	64	98	141	154	270	270
2001	281	184	111	57	123	94	290	29	81	336	75	82	336
2002	89	68	61	119	219	159	57	125	138	284	286	109	286
2003	216	121	119	202	384	86		314	260	184	192	81	384
2004	174	171	263	98	123	230	63	110	39	168	83	76	263
2005	28	216	71	49	96	69	7	208	9	419	299	185	419
2006	86	146	119	158	208	472	41	61	81	204	166	172	472
2007	184	191	126	141	361	155	62	126	21	255	118	101	361
2008	59	72	75	202	375	218	127	39	209	209	118	86	375
2009	92	59	39	195	99	159	7	182	62	112	82	224	224
2010	69	126	95	340	176	425	67	91	103	129	129	103	425
2011	119	76	104	194	97	122	195	113	9	81	286	40	286
2012	102	72	82	179	137	24	108	46	274	158	146	49	274

Cantimpalos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
2013	241	123	553	277	177	146	67	8	307	249	82	255	553
2014	220	267	214	98	212	138	175	74	92	457	263	134	457
2015	252	258	139	248	58	534	25	118	98	87	73	62	534
2016	272	324	155	251	322	74	247	227	62	165	255	61	324
2017	44	98	91		221	47	655	144	34	268	42	169	655
2018	447	234	359	458	256	221	18	42	27	198	262	85	458
2019	262	39	93	265	96	84	139	125	39	233	225	246	265
Máximo	447	324	553	458	384	534	655	314	307	457	299	270	655

Embalse del Pontón Alto	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	61	77	128	206	180	107	192	116	152	77	319	210	319
1999	90	218	118	159	217	122	56	70	98	211	115	149	218
2000	24	26	113	197	127	150	92	34	206	232	371	145	371
2001	372	114	124	107	88	163	236	41	209	268	43	65	372
2002	192	58	90	159	174	223	9	209	134	456	179	428	456
2003	216	112	255	320	268	53	3	112	65	218	352	164	352
2004	95	124	243	69	188	143	20	123	51	330	108	131	330
2005	16	169	79	93	66	60	0	106	21		368	289	368
2006	127	162	120	130	245	315	58	87	73	305	200	123	315
2007	252	202	149	108	258	198	8	50	42	223	135	24	258
2008	118	120	101	241	344	280	91	54	125	182	110	262	344
2009	194	93	182	318	90	95	0		44	135	123	121	318
2010	112	137	102	133	149	205	265	31	152	137	159	104	265
2011	250	102	202	255	154	159	39	65	3	101	308	71	308
2012	125		122	144	39	14	189	16	150	88	113	109	189
2013	270	82	264	99	264	51	120	3	93	81	174	202	270
2014	174	97	417	142		83	173	15	121		145	54	417
2015	173	188	137	258	32	330	0	93	101	49	177	62	330
2016	275	251	130		119	98	53	3		96	273	61	275
2017	167	495	126	170	133	52	358	305	13			139	495
2018	512	155		269	315	186	67	66	48	182	156	68	512
2019	234		52	123	110	71	51	233	50	156	286	105	286
Máximo	512	495	417	320	344	330	358	305	209	456	371	428	512

Jememuño	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	165		48	120	200	42	0	100	120	109	270	131	270
1999	213	144	80	80	110	65	5	80	98	200	79	145	213
2000	52	20	65	70	204	120	30		105	190	190	136	204
2001	305	140	135	30	80	125	322	55	150	242	30	67	322
2002	92	80	85	142	280	210	24	45	140	213	165	88	280
2003	185	123	80	195	148	85	0	112	280	190	120	74	280

Jememuño	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
2004	50		95	85	180		0		0	170	215	100	215
2005	6	255	40	50	155		0	10	32	360	141	100	360
2006		195	110	150		220		180	70	310	120	136	310
2007	105	160	100	150	508	180	0	18	15	190	103	20	508
2008	54	125	150	190	180	335	55	25	75	270	60	150	335
2009	75	195	110	117	125	170	0	65	35	165	87	130	195
2010	120	170	130	110	320	100	98	60	300	95	150	130	320
2011	75	85	120	275	300		150	240	0	76	160	55	300
2012	96	98	135	115	190	23	190	51	145	200	165	54	200
2013	105	230	170	120	86	91	20	250	350	275	60	335	350
2014	173	110	78	360	130	140	40	60	70	310	245	120	360
2015	150	150	50	120	15	365	95	125	50	150	70	70	365
2016	200	120	120	130	110	90	300	20	120	120	200	65	300
2017	25	200	60	40	120	180	680	170	0	185	70	110	680
2018	500	200		1000	350	200	0	0	70	200		100	1000
2019	250	0		230	0		80	30	500		720		720
Máximo	500	255	170	1000	508	365	680	250	500	360	720	335	1000

Lastras del Pozo	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	119	60	56	181	101	73	0	178	128	80	220	149	220
1999	258	165	82	105	149	398	116	51	144	180	80	108	398
2000	17	13	68	100	160	107	50	37	103	200	180	149	200
2001	340	110	87	51	139	104	325	27	163	270	56	64	340
2002	80	58	78	130	249	335	2	331	123	180	125	70	335
2003	170	95	80	163	185	145	0	278	165	195	131	60	278
2004	39	110	170	75	135	336	110	235	3	236	284	105	336
2005	33	213	50	135	70	167	0	110	132	200	200	100	213
2006	75	282	179	160	70	156	23	108	75	143	116	137	282
2007	102	176	102	112	846	280	15	168	93	238	82	35	846
2008	72	116	96	220	510	168	85	29	78	493	131	112	510
2009	108	95	54	161	123	145	0	46	31	96	135	187	187
2010	114	205	128	520	128	184	101	275	638	168	116	112	638
2011	112	108	131	234	379	195	142		0	61	151	85	379
2012	82	48	76	171	79	18	130	73	143	224	118	75	224
2013	115	95	420	115	161	21	61	23	125	143	85	342	420
2014	168	143	260	65	110	73	56	0	105	253	115	116	260
2015	256	148	110	118	42	310	50	25	25	71	68	36	310
2016	162	162	92	162	91	115	95	6	76	194	263	77	263
2017	62	153	104	49	148	30	292	183	0	121	125	135	292
2018	370	178	114	217	456	130	183	80	48	125	124	96	456
2019	200	6	89	78	145	63	33	125	212	310	390	162	390
Máximo	370	282	420	520	846	398	325	331	638	493	390	342	846

Martín Muñoz	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	321	53	62		219	103	0	71	128	114	291	163	321
1999					129	13		0		298			298
2000	79	27	122	114	224	229	37	0	91	202	216	111	229
2001	402	152	123	34	102	106	127	38	266	142	93	23	402
2002	246	38	128	127	329	254	0	114	332	167	346	102	346
2003	401	174	127	346	266	179	0	41	423	194	269	18	423
2004	216	112	233	102	523	61	23	69	0	218	387	56	523
2005	26	159	72	78	278	307	0	127	53	334	196	91	334
2006	221	190	183	112	243	176	71	36	157	262	72	52	262
2007	56	227	63	237	297	78	27	578	66	101	134	72	578
2008	46	193	43	224	274		43	49	69	313	83	101	313
2009	63	44	61	197	129	97	0	52	44	72	79	344	344
2010	101	102	89	134	132	112	86	0	143	131	64	92	143
2011	106	113	136	179	168	13	14	347	22	82	82	27	347
2012	74	37	62	393	81	26	69	101	412	214	324		412
2013	221	54	303	76	146	112	91	0	213	323	131	374	374
2014	161	122	102	72	147	62	63	64	74	302	184	62	302
2015	113	126	47	168	23	181	23		103	254		266	266
2016	326	131	193	326	194	0	217	0	21	326	338	0	338
2017	0	46	23	0	226		667	162	0	106	136	281	667
2018	208	287	133	392	416	236	327	0	58		189		416
2019	89	16	107	141			0	303	146	267	198	398	398
Máximo	402	287	303	393	523	307	667	578	423	334	387	398	667

Matapozuelos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	336	42	62	164	172	116	54	58	182	72	202	254	336
1999	282	85	64	82	100	100	56	89	158	142			282
2000	74	10	234	112	396	30	64	5	162	226	162	244	396
2001	248	128	169	38	162	10	160	82	72	212	15	54	248
2002	138	52	107	114	92	114	42	80	136	194	162	104	194
2003	286	182	92	172	76	94	6	106	272	304	154		304
2004	78	56	105	82	116	154	1	146	2	164	186	112	186
2005	28	122	45	78	62	25	0	72	25		125	68	125
2006	122	295	122	125	29	205	75	174	68	380	135	142	380
2007	125	125	154	143	390	145	28	450	445	240	345	35	450
2008	195	195	30	132	165	138	0	165	25	264	56	92	264
2009	92	62	0	105	120	115	0	65	35	205	120		205
2010	142	115	75	273	82	150	110	29	290	132	85	195	290
2011	102	56	110	162	160	75	0	95	0	92	110	42	162
2012	182	0	250	135	115	55	152	20	100	252	135	42	252
2013	140	116	200	115	62	36	42	0	315	260	22	230	315
2014	135	110	54	56	126	84	170	0	175	92	210		210
2015	92	35	55	110	45	260	15	22	102	122	190	115	260

Matapozuelos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
2016	380	135	65	132	170	15	30	0	120	140	182	150	380
2017	42	110	62	20	120	15	400	180	0	42	75	120	400
2018	160	210	390	120	310	150	50	0	40	120	150	90	390
2019	120	15	110	120	15	30	65	56	320	200	105	550	550
Máximo	380	295	390	273	396	260	400	450	445	380	345	550	550

Mingorria	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	178	28	64	255	245	55	0	122	122	82	224	160	255
1999	82	64	53	95	152	72	42	65	132	164	100	186	186
2000	45	8	106	82	252	122	27	54	112	172	124	202	252
2001	291	102	128	38	76	104	312	42	68	284	38	72	312
2002	130	55	195	82	175	61	8	205	147	152	127	81	205
2003	75	217	77	173	181	102	0	234	213	199	144	159	234
2004	36	54	149	154	144	194	1	91	11	287	226	63	287
2005	11	193	29	79	125	85	0	144	36	293	185	123	293
2006	107	204	162	101	49	82	108	88	161	213	145	81	213
2007	117	174	54	243	373	206	4	433	38	152	122	56	433
2008	45	112	57	172	248	246	70	34	353	322	66	171	353
2009	74	55	65	137	99	164	0	27	116	73	125	91	164
2010	63	143	136	287	84	177	177	21	116	86	158	98	287
2011	54	55		209	214	41	59		134	116	122	33	214
2012	117	56	42	156	126	3	89	71	458	271	123	62	458
2013	82	53	99	93	103	196	15	6	134	232	216	223	232
2014	121	54	112	300	112	214	117	82	212	308	138	107	308
2015	157	84	146	151	42	423	27	124	47	156	43	34	423
2016	208	158	118	151	126	52	200	16	162	112	214	110	214
2017	15	198	57	36	91	292	407	344	0	106	104	126	407
2018	503	361	134	206	181	125	8	0	90	185	96	40	503
2019	127	11	112	75	37	36	44	132	48	214	140	189	214
Máximo	503	361	195	300	373	423	407	433	458	322	226	223	503

Navas de oro	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	182	118	76	105	198	285		81	91	63	211	117	285
1999	186	112	75	99	121	111	22	107	113	225	61	145	225
2000	58	8	70	147	212	75	55	55	108	160	166	158	212
2001	272	133	141	36	94	99	189	201	118	183			272
2002		83	70	108	140	82	88	230	201	162	200	106	230
2003	315	75	103	228	165	44	8	400	161	236	131	59	400
2004	56	50	139	127	257	316	15	96	9	94	168	86	316
2005	25	126	51	35	59	58	0	83	76	259	210	80	259
2006	116	230	114	170	71	100	64		59	395	90	110	395

Navas de oro	Meses												Máximo
	Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2007	160	140	61	170	288	270	140	150	106	283	196	29	288
2008	68	176	45	132	236	416	44	126	56	313	60	100	416
2009	88	118	52	147	210	110	6	124	38	156	84	122	210
2010		142	100	94	155	112		50	125	96	120	180	180
2011	85	55	75	180		84	43		0	98	125	55	180
2012	81	14	95	159	50	36	320	40	142	146	104	60	320
2013	177	105	242	110	105	127	146	43	197	295	62	250	295
2014	122	85	73	86	96	44	66	0	108	204	290	89	290
2015	98	72	85	113	42		56	64	88		53	58	113
2016	293	252	79	113	120	17	133	2		151	254	74	293
2017	43	73	61	39	167	79		120	5	65	58	107	167
2018	388	223	124	159	220	313	252	127	52	63	148	122	388
2019	158	25	53	106	50	21	140	91		167	132	325	325
Máximo	388	252	242	228	288	416	320	400	201	395	290	325	416

Navas de San Antonio	Meses												Máximo
	Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1998	115	24	58	147	166	300	328		147	149	162	210	328
1999	195	130	55	96	105	65		60	131	132	100	100	195
2000	37	0	140		120	130	60	0	100	125	170	430	430
2001	358	175	143	49	90	220	200	39	115	296	71	90	358
2002	90	93	178	133	175	205	0	366	106	275	147	78	366
2003	145	224	110			51	0	290	207	193	180	203	290
2004	61	115	168	113	166	100	15	114		220	205	100	220
2005	0	270	55	49	480	290	0	150	170	275	150	140	480
2006	111	185	110	148	62	331	25	75	100	176	127	114	331
2007	171	219	107	190	357	250	0	172	50	190	153	52	357
2008	69	85	98	325	264	243	120	80	168	620	79	167	620
2009	190	104		130	105	165	0	170	47	128	100	105	190
2010	120	112	97	70	135	200	30	30	120	110	105	192	200
2011	70	106	165	245	223	82	45	195	0	105	149	42	245
2012	100	82		165	274	10	135	22	398	196	115	82	398
2013	76	47	120	80	83	16	20	25	57	130	215	200	215
2014	147	105	180	58	105	145	240	200	81	399	155	160	399
2015	195	89	135	85	25	220	45	20	60	95	110	39	220
2016	180	140	140	182	107	70	148	0	50	269	177	105	269
2017	80	582	75	140	163	72							582
2018	500	592	260	265	80	63	80	92	200	235	102	125	592
2019	200	0	100	93	65	42	35	510	100	105	125	165	510
Máximo	500	592	260	325	480	331	328	510	398	620	215	430	620

Otero de herreros	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	300	30	107	163	250	200	387	188	103	50	237	182	387
1999	270	109	100	95	152	161	69	47	323	152	65	105	323
2000	15	10	212	160	148	116	50	7	134	175	192	790	790
2001	317	157	113	67	178	245	251	114	268	235	53	57	317
2002	182	43	134	165	165	150	7	282	158	283	225	100	283
2003	163	290	132	204	300	60	0	195	210	150	236	520	520
2004	112	133	225	84	275	105	42	133	16	148	170	293	293
2005	20	200	170	78	126	122	0	134	75	210	380	103	380
2006	93	118	140	109	55	190	45	80	150	136	178	105	190
2007	210	160	116	154	355	330	0	108	73	250	136	43	355
2008	65	98	75	253	248	230	40	103	105	490	116		490
2009	163	96	95	246	95	160		10	36	177	100	78	246
2010	97	96	100	63	157	135	159	76	114	100	75	85	159
2011	115	104	236	310	165	233	33	248	38	88	220	42	310
2012	100	65	90	163	280	8	53	19	355	135	105		355
2013	100	96	200	110	145	57	48	8	53	145	122	240	240
2014	150	100	230	53	98	124	60	55	104	241	290	96	290
2015	240	118	140	111	28	395	36	80	100		100	137	395
2016	650	165	110	143	185	60	310	45	75	160	190	105	650
2017	59	870	86	135	140	40	468	263	1	203	55	135	870
2018	610	130					337	179	88	190	155	80	610
2019	157	4	45	105	107	47	237	230	48	145	240	140	240
Máximo	650	870	236	310	355	395	468	282	355	490	380	790	870

Rapriegos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	230	80	100	90	178	285	40	465	120	80	205	205	465
1999	235	95	47	80	120	0	85	130	122	185	63	105	235
2000	45	30	140	60	398	35	70	100	150	170	200	180	398
2001	285	100	120	25	55	90	220		80	120	15	45	285
2002	110	75	180	110	140	120	90	160	110	120	185	100	185
2003	260	75	115	200	180	470	85	335	180	205	190	115	470
2004	55	75	130	95	240	160	15	50	0	130	270	110	270
2005	0	165	65	60	185	65	0	80	0	330	160		330
2006	95	410	170	115	80	60	100		55	370	100	115	410
2007	115	120	65	150	470	320	160	370	100	275	195	20	470
2008	75	150	80	175	260	300	35	0	60	280	40	100	300
2009	90	80	20	120	135	215	0	45	105	150	55	100	215
2010	85	135	85	110	90	185	30		360	100	85	155	360
2011	70	70	100	155	60	120	27	270	0	72	135	35	270
2012	105	45	58	200	40	18	470	95	147	299	180	75	470
2013	140	115	240	150	80	180	140	240	195	285	60	295	295
2014	95	70	120	50	60	120	45	0	185	230	280	90	280
2015	100	60	85	105	20	160	25	100	90	155	110	55	160

Raparriegos	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
2016	295	188	75	130	120	0	80	0	70	170	300	100	300
2017	80	70	45	35	180	245	400	70	0	55	30	100	400
2018	300	300	130	225	205	200	100	0	70	60	145	115	300
2019	140	20	95	140	65	10	25	80	90	235	122	285	285
Máximo	300	410	240	225	470	470	470	465	360	370	300	295	470

San Cristóbal de la Vega	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	210	100	60	130	160	300	0	400	110	80	230	150	400
1999	250	103	100	75	160	0	130	135	163	220	60	180	250
2000	40	0	190	80	380	25	95	110	70	223	225	185	380
2001	320	110	150	35	80	110	240	70	60	190	20	40	320
2002	140	100	192	130	150	145	135	170	135	160	200	160	200
2003	275	70	132	210	160	400	120	250	250	250	160	110	400
2004	80	80	210	115	320	108	20	45	15	115	260	130	320
2005	0	135	70	70	240	65	0	50	25	350	200	65	350
2006	100	400	190	150	65	150	130	90	53	440	100	135	440
2007	110	120	60	150	375	400	0	350	273	295	220	25	400
2008	80	160	50	180	300	315	80	85	35	330	70	100	330
2009	100	140	25	140	160	210	0	100	60	170	60	180	210
2010	120	140	130	130	100	240	15	0	230	135	100	210	240
2011	80	90	90	170	100	50	30	300	0	110	135	50	300
2012	60	0	45	260	30	10	480	70	140	270	180	70	480
2013	135	80	180	130	120	150	60	190	220	320	65	330	330
2014	100	80	40	60	70	155	130	0	210	220	280	30	280
2015	100	90	90	110	20	230	10	170	100	200	90	65	230
2016	300	200	70	130		50	270	30	50	250	300	120	300
2017	25	140	50	35	200	100	540	110	10	75	0	130	540
2018	210	280	140	130	260	230	70	0	175	70	140	120	280
2019	190	50	70	95	80	20	35	50	60	260	175	320	320
Máximo	320	400	210	260	380	400	540	400	273	440	300	330	540

Segovia	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	113	57	99	176	180	78	0	250	114	81	261	134	261
1999	168	146	132	82	198	107	73	92	186	156	103	88	198
2000	12	23	105	150	108	126	44	90	102	162	236	201	236
2001	305	94	125	84	150	153	294	25	194	228	66	83	305
2002	134	73	71	118	189	306	68	120	115	407	148	168	407
2003	203	73	108	181	216	67	36	208	209	163	142	78	216
2004	64	94	211	66	187	165	39	132	28	152	86	121	211
2005	22	197	103	71	125	210	0	121	40	191	316	146	316
2006	88	121	87	142	85	381	270	66	44	209	167	131	381
2007	236	201	108	108	295	293	41	96	48	252	116	17	295

Segovia	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
2008	92	88	79	174	270	243	232	3	150	174	120	120	270
2009	126	61	131	209	217	175	0	13	31	112	115	107	217
2010	140	170	96	114	115	226	117	234	325	117	117	65	325
2011	120	59	219	178	86	47	404	145	46	87	284	47	404
2012	107	39	78	122	146	16	46	44	198	132	148	66	198
2013	96	84	206	88	218	36	44	4	142	122	82	250	250
2014	120	100	238	84	84	58	76	50	96	222	174	86	238
2015	206	124	104	130	50	322	6	88	60	68	120	60	322
2016	206	148	112	144	124	54	148	8	116	120	254	62	254
2017	52	138	102	56	196	56	344	216	0	188	52	96	344
2018	355	140	130	230	302	98	86	20	54	158	150	48	355
2019	204	12	42	94	174	62	100	340	26	162	176	114	340
Máximo	355	201	238	230	302	381	404	340	325	407	316	250	407

Satelital	Meses												
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máximo
1998	53	14	13	15	20	12	2	8	14	7	3	19	53
1999	12	6	7	7	17	14	5	4	23	24	13	8	24
2000	8	1	6	24	18	10	3	2	6	14	25	34	34
2001	39	27	32	3	7	3	8	4	4	18	1	3	39
2002	14	6	19	9	9	6	2	6	11	21	29	20	29
2003	17	20	8	23	8	4	1	5	12	24	42	19	42
2004	12	23	23	11	18	10	6	8	2	23	11	7	23
2005	10	11	7	8	12	8	1	2	2	21	15	20	21
2006	21	15	11	9	9	17	4	5	7	34	27	1	34
2007	15	37	19	21	26	12	6	8	5	16	19	6	37
2008	2	27	6	32	27	24	4	3	19	40	3	13	40
2009	13	13	3	12	11	8	3	2	3	19	15	53	53
2010	21	12	14	9	16	20	6	6	16	30	2	24	30
2011	22	16	16	40	9	8	8	9	1	10	42	1	42
2012	12	3	7	14	9	3	6	3	17	21	28	2	28
2013	23	11	58	16	11	5	3	3	13	16	8	22	58
2014	17	16	14	9	14	10	10	1	17	32	31	20	32
2015	11	8	10	22	6	28	3	5	4	25	20	6	28
2016	15	6	13	50	18	3	7	1	7	19	24	10	50
2017	15	18	11	15	11	6	32	19	2	8	12	6	32
2018	20	23	29	39	24	14	4	1	6	13	23	12	39
2019	6	1	8	14	7	2	5	17	15	13	27	44	44
Máximo	53	37	58	50	27	28	32	19	23	40	42	53	58