



## **Trabajo Fin de Grado**

### **Grado Ingeniería Civil**

Evaluación de los procesos erosivos  
frente a precipitaciones en condiciones de  
cambio climático en parcelas  
experimentales situadas en Teruel.

**Autor:**

**Patricia Coronado Vecina**

**Tutores:**

**José Ángel Aranda Domingo**

**Carles Beneyto Ibáñez**

**Valencia, septiembre 2019**

Universidad Politécnica de Valencia  
Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos



## **TABLA DE CONTENIDO**

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. INTRODUCCION Y CONTEXTO.....	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.3. METODOLOGÍA.....	13
2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	15
2.1  ÁREA DE ESTUDIO.....	17
2.1.1  Situación geográfica.....	17
2.1.2  Características climáticas generales.....	18
2.1.3  Topografía.....	20
2.1.4  Marco geológico y edafología.....	22
2.1.5  Usos del suelo y actuaciones antrópicas.....	24
2.2  INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	27
2.2.1  Precipitación y temperatura.....	27
2.2.2  Obtención y cálculo de la ET <sub>0</sub> .....	28
3. MODELO HIDROLÓGICO.....	31
3.1  DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS.....	33
3.2  IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	36
3.2.1  Estimación de mapas parámetros.....	36
3.2.2  Calibración.....	37
3.2.3  Validación.....	42
3.3  DESCRIPCION DEL SUBMODELO DE SEDIMENTOS.....	42
3.4  IMPLEMENTACIÓN DEL SUBMODELO DE SEDIMENTOs.....	43

3.4.1	Estimación de mapas de parámetros .....	44
3.4.2	Calibración .....	45
3.4.3	Validación .....	49
4.	GENERADOR METEOROLÓGICO.....	53
4.1	SELECCIÓN DEL GENERADOR METEOROLOGICO .....	56
4.2	CALIBRACION DEL GENERADOR METEOROLÓGICO .....	57
5.	MODELOS CLIMÁTICOS .....	59
5.1	Selección del modelo climático .....	61
5.2	Corrección de sesgo .....	67
6.	RESULTADOS .....	71
7.	CONCLUSIONES .....	77
8.	REFERENCIAS .....	81
9.	ANEJO FOTOGRÁFICO .....	85

## **LISTADO DE FIGURAS**

Figura 1: Localización de Teruel.....	17
Figura 2: Localización de las parcelas en cuenca de estudio y punto de desagüe.....	18
Figura 3: Características climáticas provincia de Teruel.....	19
Figura 4: Datos meteorológicos Teruel (año 2009).....	19
Figura 5: Gráfica de temperaturas anuales en la ciudad de Teruel. ....	20
Figura 6: Modelo de elevación digital de Teruel (IGN) con parcelas. ....	21
Figura 7: Mapa de pendientes con indicación de la situación de las parcelas. Pendiente min 0,57% (verde), pendiente máxima 32% (rojo). ....	22
Figura 8: Mapa IGME Teruel .....	23
Figura 9: Mapa geológico de la zona del noroeste de Teruel. ....	24
Figura 10: Vista aérea de las canteras y la Ronda de Barrios. ....	25
Figura 11: Ubicación de las canteras de arcillas. ....	26
Figura 12: Mapa de situación de los puntos de toma de datos.....	28
Figura 13: Esquema conceptual a escala de celda del modelo distribuido TETIS.....	34
Figura 14. Conceptualización horizontal del modelo distribuido TETIS	35
Figura 15: Mapa de direcciones de flujo. ....	36
Figura 16: Gráfica comparativa entre caudales generados y Temez. ...	41
Figura 17: Isolíneas del factor R (ICONA).....	47
Figura 18: Mapa de pérdida de suelo en la cuenca de estudio. ....	49
Figura 19: Localización de las parcelas experimentales. ....	49
Figura 20: Localización de las mayores zonas de erosión de la cuenca.	50
Figura 21: Parcela experimental 2.....	51
Figura 22: Muestra a partir de la que se ha tomado la medición de erosión. ....	52

Figura 23: Comparativa en periodo de 1000 años del generador GWEX frente a MulGETS. ....	56
Figura 24: Grids utilizados en la calibración del generador meteorológico. ....	58
Figura 25: Gráficas comparativas de los 11 modelos climáticos en temperatura máxima, temperatura mínima, porcentaje de días secos y precipitaciones. ....	63
Figura 26: Comparativa de 8 modelos climáticos en porcentaje de días secos y precipitación. ....	64
Figura 27: Gráficas de porcentaje de días secos y precipitación de los modelos climáticos 1, 3, 4, 5 y 11. ....	65
Figura 28: Modelo climático elegido comparativa con observado. ....	67
Figura 29: Plotting positions o posiciones gráficas de la precipitación diaria anual máxima observada (negro), proyección en periodo histórico (azul) y proyección en periodo histórico corregida (roja) del modelo climático n°4. ....	68
Figura 30: Erosión final en escenario de cambio climático a largo plazo (amarillo=erosión casi nula; marrón=máxima erosión). ....	75
Figura 9.1: Interior de la parcela experimental 1. ....	87
Figura 9.2: Interior de la parcela experimental 1. ....	87
Figura 9.3: Muestra de erosión utilizada en el trabajo actual. ....	88
Figura 9.4: Muestra anterior tomada de cerca. ....	88
Figura 9.5: Parcela 1. ....	89
Figura 9.6: Parcela 1. ....	89
Figura 9.7: Parcela 2. ....	90
Figura 9.8: Parcela 3. ....	90

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 1: Parámetros de las ecuaciones de Fuller (CEDEX). .....	40
Tabla 2: Factores correctores para los que se ajusta el modelo hidrológico TETIS.....	42
Tabla 3: Parámetros usados en TETIS.....	43
Tabla 4: Factor C según zona. ....	45
Tabla 5: Valores de los factores K y C.....	45
Tabla 6: Valor LS en función de la pendiente.....	48
Tabla 7: Valores de los factores correctores para el submodelo de sedimentos TETIS. ....	48
Tabla 8: Modelos climáticos proporcionados por el proyecto CORDEX. 62	
Tabla 9: Estadísticas comparativas de precipitación actual frente a escenario de medio plazo en cambio climático. ....	73
Tabla 10: Estadísticas comparativas de precipitación actual frente a escenario de largo plazo en cambio climático.....	73
Tabla 11: Erosión anual estimada por escenario.....	74
Tabla 12: Incremento de la erosión por periodo. ....	74





---

# ***1. INTRODUCCIÓN***

---



# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. INTRODUCCION Y CONTEXTO

El suelo es un elemento importante y a menudo descuidado del sistema climático. Por tanto, la erosión de éste es un proceso muy relevante que requiere un estudio específico que permita estimar las posibles variaciones del mismo. En sentido estricto, la erosión tiene que ver con el cambio o la transformación de la cubierta vegetal. Esta transformación se refiere sobre todo a los procesos de pérdida de suelo y la producción de sedimentos.

En este trabajo se va a tratar el tema de la erosión desde el punto de vista de la producida por el fenómeno de la precipitación. Es necesario resaltar el gran impacto que tienen las precipitaciones sobre la cubierta del terreno. Tras cualquier periodo de lluvias se lleva a cabo un proceso de segregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por las propias gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, este proceso se define como erosión hídrica. La duración e intensidad de las precipitaciones son el factor principal a considerar para comprender el modo de erosión, pero también son necesarias otras variables como conocer la época del año, el grado de cobertura del suelo por vegetación, desarrollo de raíces y las características del suelo como es su textura, capacidad de infiltración y agregación de sus partículas.

El interés por este tipo de estudios ha aumentado considerablemente en los últimos años. Tanto es así que al hacer una rápida búsqueda en diferentes bases de datos internacionales encontramos más de ochenta mil publicaciones de artículos científicos de relevancia relacionados con la erosión del suelo. Este considerable interés no supone ninguna sorpresa dado que el tema de la erosión afecta directamente a grandes problemáticas actuales como son la amenaza ambiental que supone la erosión del suelo en relación a la sostenibilidad y productividad en el planeta, el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías de campo y laboratorio aplicadas a la informática y la computación y la necesidad de aportar medidas eficaces para el control de la erosión.

En el caso concreto de España, esta problemática es de gran relevancia dado que, junto con otros países de la región mediterránea, está considerada como el área más susceptible de Europa en cuanto a riesgo de erosión del suelo debido, en gran medida, a las características climatológicas que presentan largos periodos secos seguidos por tormentas de gran intensidad entre otros.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Además, el arrastre de los nutrientes que componen el suelo que producen las lluvias torrenciales, presenta una problemática cada vez mayor debido a la merma de suelo cultivable frente a unas poblaciones cada vez mayores.

Es debido al desequilibrio que presentan estas zonas mediterráneas entre la tasa de formación y pérdida del suelo y las pérdidas económicas que este fenómeno ha supuesto durante las últimas décadas, que se han impulsado numerosas estrategias y programas de prevención de la erosión con el fin de asegurar un uso sostenible del suelo. Por ello, la cartografía de riesgos de erosión del suelo se está convirtiendo cada vez más en una necesidad a la hora de realizar una planificación sostenible en la ordenación del territorio.

Además, los efectos del cambio climático son ya un hecho poco discutible. Cada vez es más apreciable el aumento de la temperatura a nivel global: la mayor dureza e intensidad de las olas de calor o frío, la intensificación de los periodos de sequía o la cada vez mayor frecuencia y violencia de los sistemas convectivos mesoescalares, por ejemplo, son claros indicadores de que el cambio climático se ha introducido en nuestras vidas cotidianas. Según Michael et al., (2005) el cambio climático producirá un incremento aun mayor de los eventos extremos de precipitación, lo que producirá cambios en el conocido ciclo hidrológico y aumentará la desertificación. No sólo eso, sino que el cambio climático dará lugar a modificaciones en los patrones de temperaturas y precipitación cuyo impacto se verá reflejado en el proceso de producción de biomasa, los ratios de infiltración, las texturas del suelo y variaciones en los usos del suelo.

Todo lo anterior es lo que motiva el presente trabajo, con la finalidad de obtener un mejor entendimiento de los procesos erosivos en el terreno a consecuencia directa de la precipitación tanto a día de hoy como en el futuro bajo los posibles efectos del cambio climático.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es evaluar los procesos erosivos en el terreno a consecuencia de la precipitación en escenarios de cambio climático, obteniendo las posibles diferencias entre las pérdidas de suelo que se produce actualmente y la que se producirían en climas futuros bajo los efectos del

# 1. INTRODUCCIÓN

---

cambio climático. El estudio se centrará en tres parcelas experimentales situadas en las proximidades de la ciudad de Teruel.

## 1.3. METODOLOGÍA

La metodología que se ha utilizado en el presente trabajo para lograr los objetivos anteriormente citados podría diferenciarse en tres pasos que, en líneas generales, podrían resumirse como: 1) obtención de pérdidas de suelo en condiciones de clima actual; 2) obtención de pérdidas de suelo en condiciones de clima futuro; y 3) comparativa y análisis de resultados.

Para la modelización de las pérdidas de suelo, tanto para clima actual como para clima futuro, se ha utilizado un modelo hidrológico distribuido en el espacio. Este tipo de modelos son alimentados con series de precipitación y temperatura. Desafortunadamente, la sistematización de los registros pluviométricos y de temperaturas no se llevó a cabo en España hasta hace tan solo unos pocos años, por tanto, las series de precipitación y temperatura son todavía bastante cortas (unos 50-60 años en el mejor de los casos). Éstas, resultan insuficientes para los objetivos de este trabajo, lo que se solucionó mediante el uso de un generador meteorológico estocástico, capaz de reproducir series sintéticas tanto de precipitación como de temperatura manteniendo los mismos estadísticos de la serie de partida.

Así pues, se partió de la información climatológica de partida (clima actual, solamente 37 años) y se generaron mil años de precipitación y temperatura a través del generador meteorológico. Estas series fueron utilizadas como input del modelo hidrológico, obteniéndose el volumen de sedimentos transportados y por tanto las pérdidas de suelo.

Para el caso de clima futuro, se obtuvo información del proyecto EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014). Esta información consistía en series de precipitación y temperatura proveniente de 11 modelos climáticos (combinaciones de modelos de circulación global y modelos regionales) para los periodos:

- 2041 – 2070: Proyección a medio plazo
- 2071 – 2100: Proyección a largo plazo
- 1971 – 2000: Histórico (Hindcast)

## 1. INTRODUCCIÓN

---

De entre todos los modelos, comparando las series en periodo histórico con nuestra serie observada, se seleccionó la que mejor se ajustaba (Modelo 4: ICHEC-EC-EARTH\_r3i1p1\_HIRHAM5\_v1), y se descartaron las demás. Puesto que, como se verá más adelante, estas proyecciones no pueden servir directamente como *input* de un modelo hidrológico, se llevó a cabo una corrección de sesgo de la serie seleccionada en periodo histórico mediante la técnica *empirical quantile mapping*, la cual fue después aplicada en ambas proyecciones (medio y largo plazo).

Una vez corregidas las series del modelo seleccionado para medio y largo plazo, como en el caso de clima actual, se extendieron las series de precipitación y temperatura mediante el generador meteorológico y se introdujeron en el modelo hidrológico para así obtener el volumen de sedimentos perdidos.

---

**2. *ÁREA DE  
ESTUDIO E  
INFORMACIÓN  
DISPONIBLE***

---





## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---

A lo largo de este apartado se pone en situación al lector describiendo la zona de estudio, situación geográfica, características climáticas y características principales del suelo. También se comentará el origen de los datos de precipitación y temperatura utilizados en futuros apartados.

### 2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Se va a llevar a cabo una descripción de las características más importantes de la cuenca de estudio que, en apartados más avanzados de este estudio, permitirán comprender los distintos comportamientos del modelo.

#### 2.1.1 Situación geográfica

La cuenca de estudio se encuentra al este de la ciudad de Teruel (Comunidad de Aragón, España), (Figura 1). En concreto al noreste de la ciudad, donde encontramos tres parcelas experimentales en las que se lleva más de cinco años trabajando, recogiendo y analizando numerosa información periódicamente de diferentes variables como puede ser, temperaturas, precipitación, humedad del suelo, o pérdida de suelo entre otras. Estas tres parcelas tienen un área de 84m<sup>2</sup>, concretamente 6x14m, cada una y se encuentran dentro de una pequeña cuenca que cubre una extensión de 0,28 km<sup>2</sup> (Figura 2) que será sobre la que se implementará el modelo hidrológico como se verá en los siguientes capítulos.

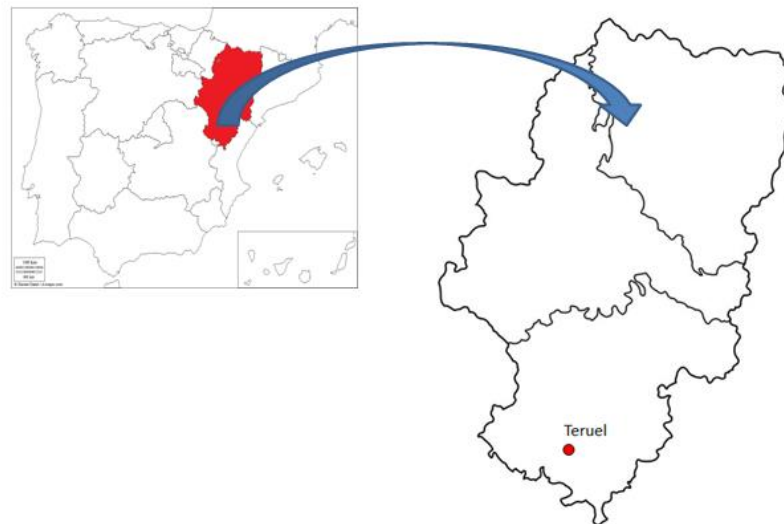
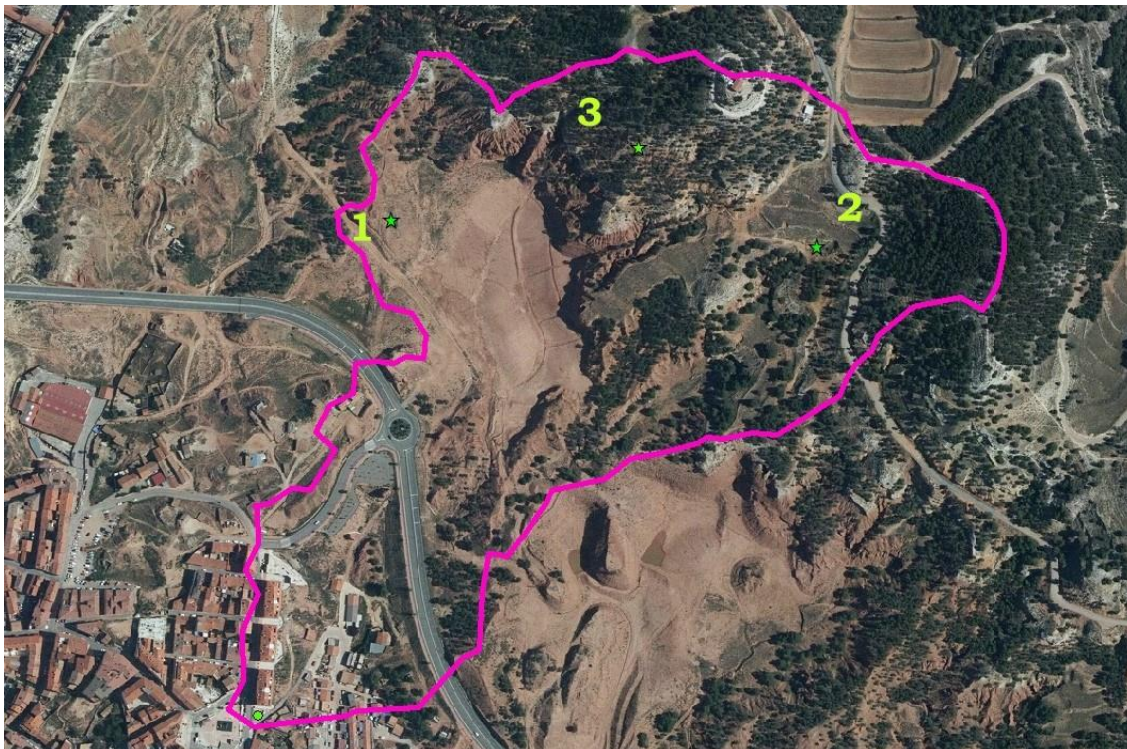


Figura 1: Localización de Teruel.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE



*Figura 2: Localización de las parcelas en cuenca de estudio y punto de desagüe.*

El rango de altitud de ésta varía entre 880 y 1,070 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra delimitada por algunas formaciones montañosas en su divisoria norte y por la ciudad de Teruel en las zonas sur y oeste, introduciéndose en este extremo en el núcleo de la ciudad y siendo además por donde desagua la cuenca (Figura 2).

### **2.1.2 Características climáticas generales**

La climatología de la zona se clasifica como clima mediterráneo continentalizado. Éste se caracteriza por temperaturas extremas, muy bajas en invierno y altas en verano. Concretando para provincia de Teruel, en particular en la zona donde se localizan las parcelas de estudio, la información sobre precipitaciones muestra unas condiciones climáticas de clima subcontinental frío.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

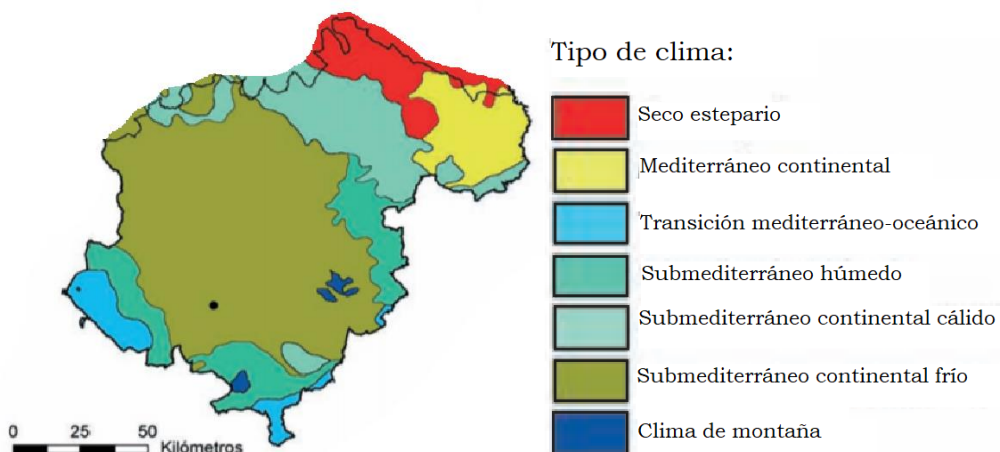


Figura 3: Características climáticas provincia de Teruel.

La pluviometría anual de este tipo de clima muestra un carácter estacional de las precipitaciones que tienden a concentrarse hacia el final de la primavera y el principio del otoño. Es importante destacar que en esta zona se produce un fenómeno de tormentas de verano de forma clara con precipitaciones abundantes que descargan la mayor cantidad de lluvia del año en pocas horas como se puede observar en el ejemplo del año 2009 (Figura 4).

ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE TORREMOCHA DEL JILOCA (TERUEL)							INFORME ANUAL 2009 (I)						
Plaza de la Fuente, s/n			Teléfono: 978-861091										
44381 Torremocha del Jiloca (Teruel)			e-mail: vicente.aupi@arrakis.es										
MES	TEMP med	MAX med	MIN med	MAX abs	MIN abs	OSC.	PREC. total	MAX 24h	DÍAS prec	DÍAS lluvia	DÍAS nieve	DÍAS helada	DÍAS torm.
Enero	1,0	6,0	-4,1	16,1	-10,4	26,5	33,1	7,0	16	11	6	25	0
Febrero	2,9	10,2	-4,5	18,5	-9,5	28,0	3,3	1,8	5	3	2	25	0
Marzo	5,9	14,7	-2,9	23,0	-7,1	30,1	40,1	15,2	11	8	5	27	0
Abril	7,2	14,3	0,2	24,5	-2,3	26,8	37,3	18,6	12	11	2	16	2
Mayo	13,9	22,8	5,0	29,6	-1,0	30,6	19,8	13,4	8	8	0	5	5
Junio	18,0	28,1	7,9	35,3	0,2	35,1	10,9	5,3	8	8	0	0	6
Julio	22,0	32,4	11,6	37,4	2,3	35,1	3,8	3,3	2	2	0	0	3
Agosto	22,1	31,5	12,7	35,7	10,2	25,5	63,4	28,9	6	6	0	0	6
Septiembre	15,7	23,2	8,3	32,6	1,5	31,1	47,7	21,9	8	8	0	0	6
Octubre	12,5	21,0	4,0	29,5	-7,6	37,1	7,8	4,2	4	4	0	5	1
Noviembre	7,9	15,3	0,5	22,6	-7,0	29,6	10,2	5,1	6	5	1	14	0
Diciembre	2,9	8,8	-3,1	17,2	-18,3	35,5	55,2	12,9	14	12	5	23	0
<b>AÑO</b>	<b>11,0</b>	<b>19,0</b>	<b>3,0</b>	<b>37,4</b>	<b>-18,3</b>	<b>55,7</b>	<b>332,6</b>	<b>28,9</b>	<b>100</b>	<b>86</b>	<b>21</b>	<b>140</b>	<b>29</b>

Figura 4: Datos meteorológicos Teruel (año 2009).

La precipitación en forma de nieve se suele dar en los meses entre diciembre y abril con una media de 11 días de nieve al año.

En cuanto a las temperaturas, la media anual en la ciudad de Teruel es de 11,8°C (Agencia Estatal de Meteorología, 2019). Es conveniente comentar

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---

que al tratarse de datos obtenidos en una estación localizada en la ciudad y, al analizar la información obtenida de las parcelas experimentales, se ha podido concluir que las temperaturas en la zona de estudio son aproximadamente dos grados por debajo debido a la existencia de una isla térmica que forma la ciudad.

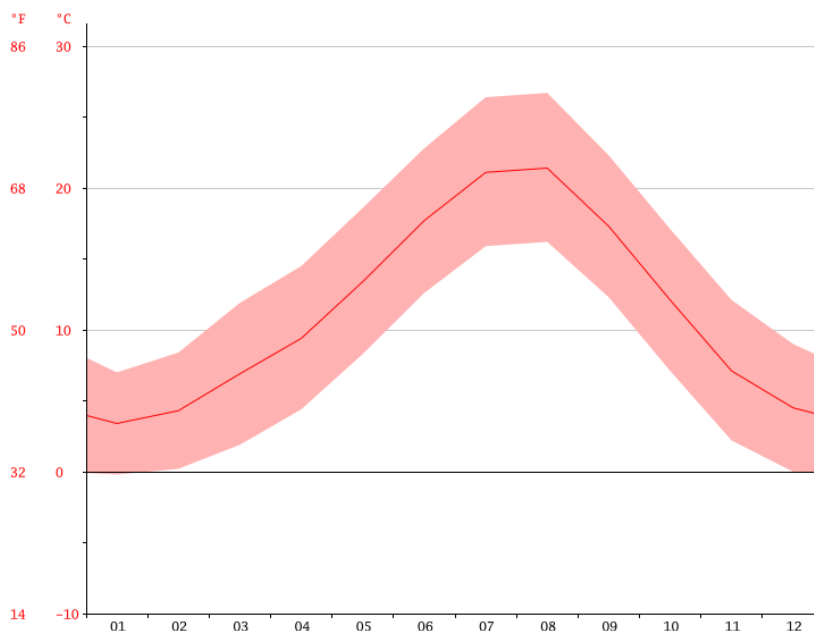


Figura 5: Gráfica de temperaturas anuales en la ciudad de Teruel.

Otra característica importante a resaltar es la aparición de heladas en los meses de noviembre a marzo. Esto tiene una gran relevancia de cara a nuestro estudio puesto que provoca un hinchamiento del terreno. Cuando las temperaturas son muy bajas se pueden producir lentejones de varios centímetros de espesor debido a la congelación del agua localizada en los huecos del terreno. Esta expansión puede llegar a ser del orden del 10% y puede llevar a levantamientos del terreno de hasta 20 centímetros. Si bien es cierto que no en todos los tipos de terreno la afección de las heladas es tan relevante en nuestro caso de estudio nos encontramos en suelos mayoritariamente arcillosos que se ven muy afectados por este proceso de hinchamiento por heladas.

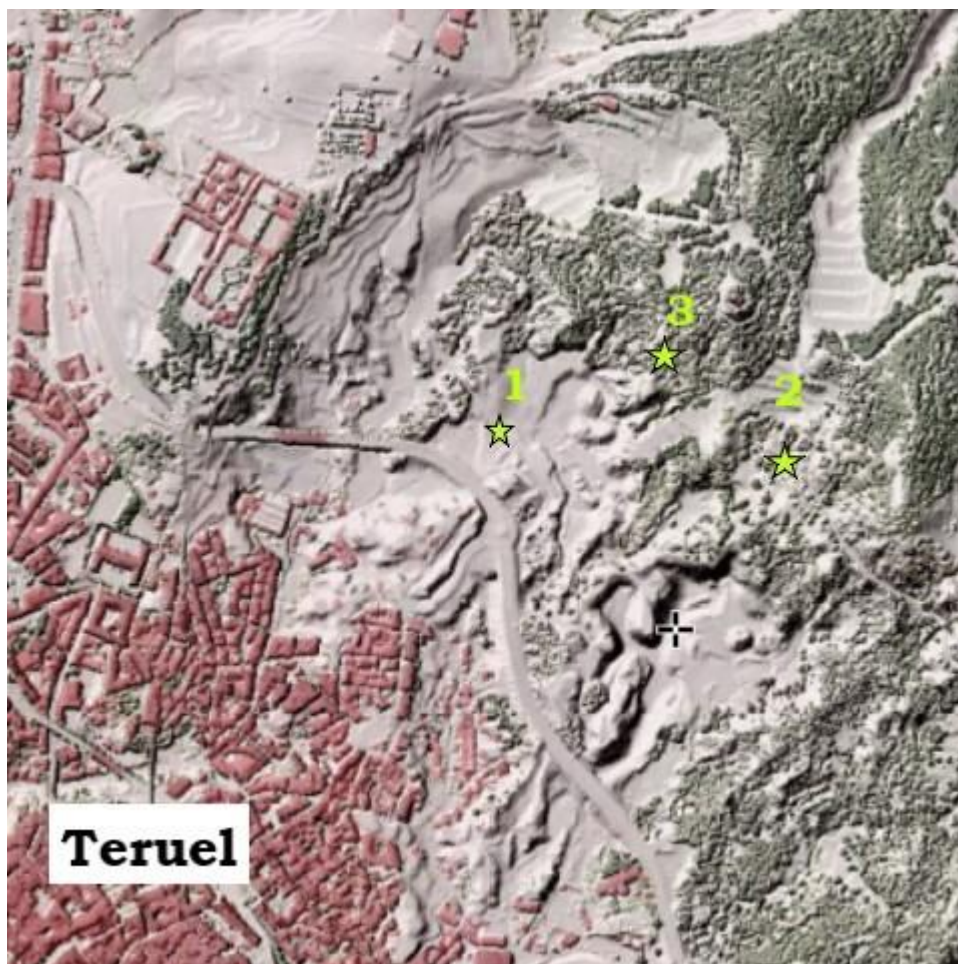
### 2.1.3 Topografía

Las distintas altitudes presentes en la cuenca de estudio podemos observarlas en la figura 6. Como se ha explicado con anterioridad, la cuenca de estudio se encuentra entre unas cotas de 880 y 1070 metros de altitud.



## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---



*Figura 6: Modelo de elevación digital de Teruel (IGN) con parcelas.*

Es de particular interés fijarse en el mapa de pendientes de esta zona (Figura 7) debido a que hay áreas donde la pendiente es el factor principal de erosión. Como sabemos el objetivo principal de este estudio es el de obtener la pérdida de suelo en la cuenca introducida en apartados anteriores y, en concreto, en las parcelas de estudio.

Según el mapa de pendientes (Figura 7), obtenido a partir del modelo de elevación digital de la zona, se obtiene una pendiente del 7,29% en la parcela 1, 12,46% en la parcela 2 y del 23,77% en la parcela 3. Al observar con más detalle la zona, se llega a la conclusión de que estos datos de pendientes serán de gran utilidad más adelante, esto se debe se puede apreciar que la parcela 1 se encuentra en la zona de menores pendientes pero sin vegetación al contrario que la parcela 3 que se encuentra en la zona de mayores pendientes pero la cubre una espesa vegetación, sin embargo, es en la parcela 2 donde se une falta de vegetación y una pendiente relevante.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Esta información habrá que tenerla en cuenta en próximos apartados al obtener las erosiones finales de la cuenca dado que probablemente afecte al estudio.

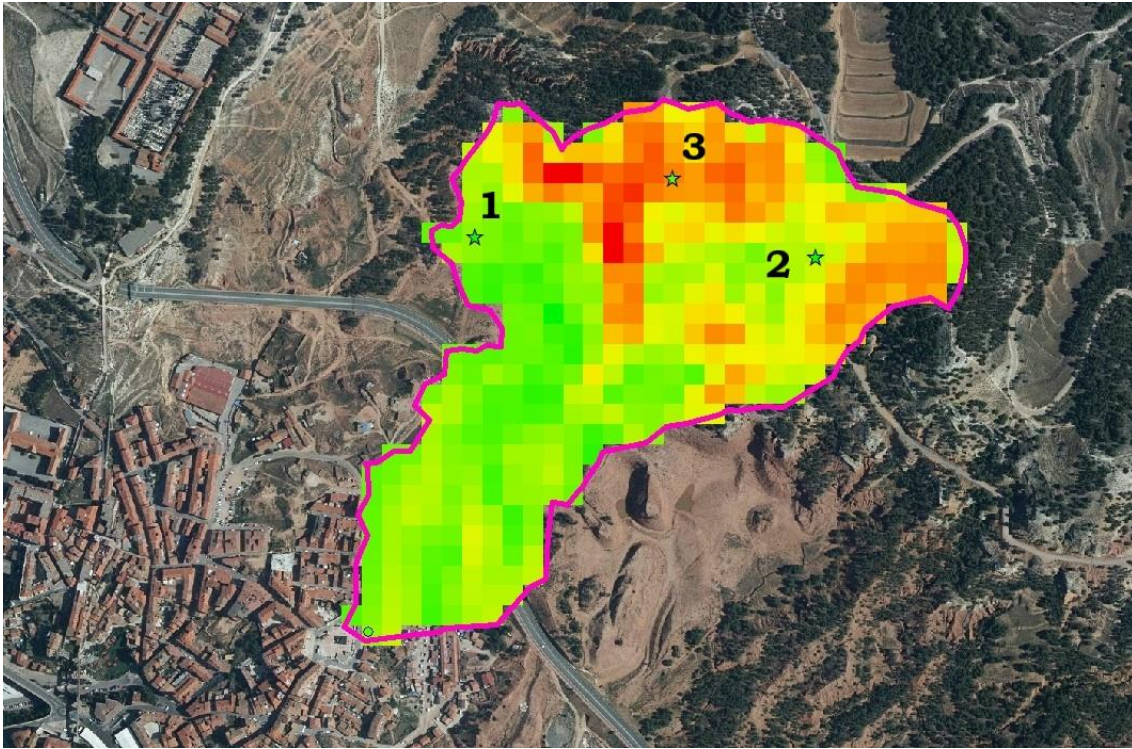


Figura 7: Mapa de pendientes con indicación de la situación de las parcelas. Pendiente min 0,57% (verde), pendiente máxima 32% (rojo).

### 2.1.4 Marco geológico y edafología

El marco geológico de la cuenca contiene gran cantidad de materiales muy diversos todos ellos pertenecientes al período del Mioceno superior y aquellos más cercanos a la ciudad de Teruel tienen carácter aluvial (“MapasIGME - Portal de cartografía del IGME: Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (1ª Serie) - Hoja 567 (TERUEL),” n.d.).



## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

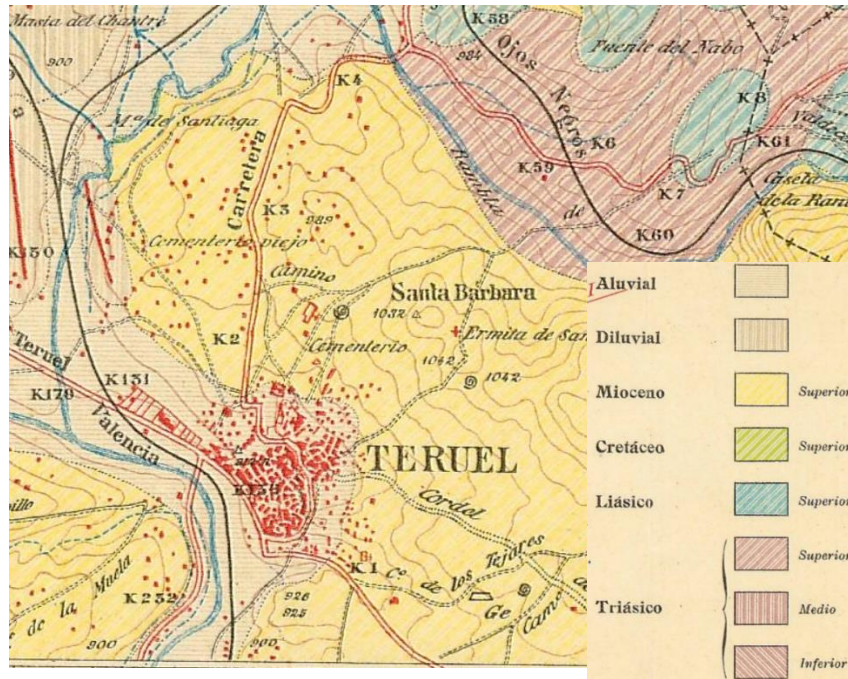


Figura 8: Mapa IGME Teruel

Además se han clasificado, según información obtenida en mapas geológicos del IDE Aragón, los materiales observados de forma que la edafología de la cuenca se compone de arcillas rojas, areniscas y conglomerados en su mayor parte. Estos materiales en su potencia máxima sobrepasan los 200 m y según su naturaleza litológica dominante presentan una morfología en lomas cuando dominan los conglomerados y en cárcavas y bad lands cuando la litología se hace más fina. En este afloramiento la presencia de conglomerados es menor, destacando la abundancia de arcillas rojas (Figura 9), lo que explica el uso de la zona como canteras de arcillas. Debido a que estos últimos materiales son su componente principal, puede determinarse que la morfología de la zona será de cárcavas.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---

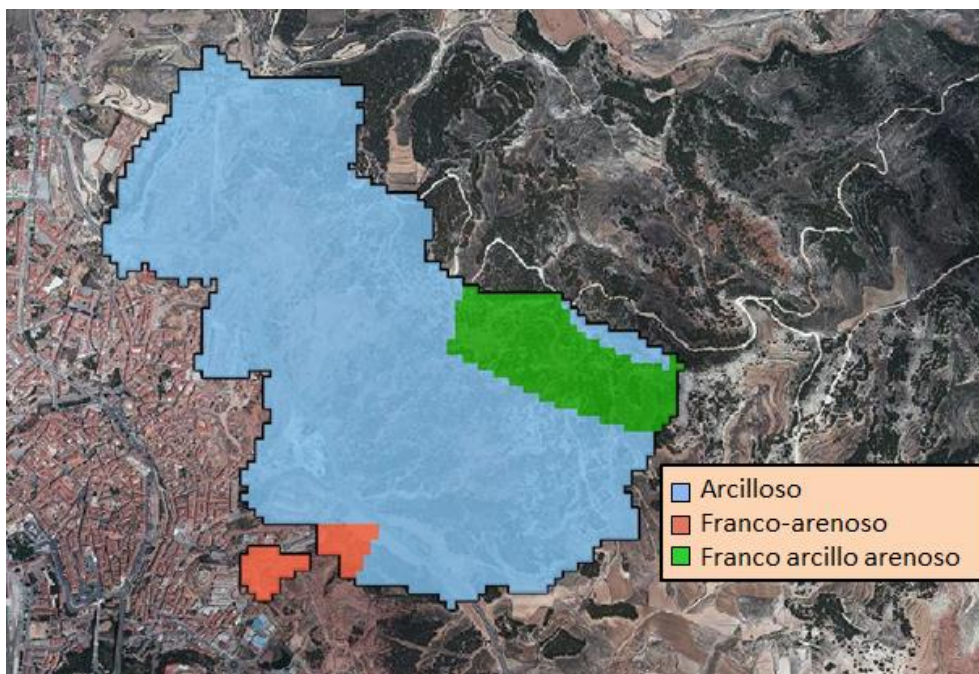


Figura 9: Mapa geológico de la zona del noroeste de Teruel.

### 2.1.5 Usos del suelo y actuaciones antrópicas

La distribución de los usos del suelo está estrechamente ligada a las características del clima, del relieve y de los suelos. Además, influyen también factores sociales, como el tamaño de las explotaciones agrarias y la organización del trabajo.

Puede comprobarse que en las provincias del Norte y Noroeste de España, de clima húmedo y relieve montañoso, predominan los suelos ocupados por pastos y bosques, destinados a la ganadería y a la explotación forestal. En las provincias de la Meseta, y en las depresiones del Guadalquivir y el Ebro, son protagonistas las tierras de cultivo, sobre terrenos llanos o suavemente ondulados de las campiñas y llanuras sedimentarias. Sobre la penillanura ibérica y bajo condiciones de clima mediterráneo seco abundan las tierras adehesadas, que combinan pastizales y cubierta arbórea de encinas y alcornos. En las provincias que bordean el Mediterráneo y las Baleares el predominio de suelos cubiertos por pastos, matorrales y bosques tapizando las sierras además de los cultivos las llanuras litorales, vegas y huertas. (Por and Age, 2004)

Para concretar, en nuestra zona de estudio, el uso del suelo se distribuye casi en su totalidad en vegetación dispersa sin ningún otro tipo de uso más relevante en la actualidad. A pesar de ello, sí que podemos encontrar unos



## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---

efectos claros debidos a la mano del hombre en el pasado debido a obras de minería. Estos cambios fueron determinantes y condicionan transformación de los procesos naturales del ámbito de actuación.

Se destacan tres actuaciones importantes sobre el área analizada: la explotación minera de las canteras de arcillas, la Escombrera de los Algezares y la Ronda de Barrios.

La explotación minera de las canteras de arcillas es la zona sobre la que se centra la amplitud del proyecto. Esta zona ha sido degradada durante siglos y en ella se encuentra plasmada la acción del hombre. Se trata de un terreno desnudo, en el que no hay vegetación, y con la característica de que posee pequeñas elevaciones con fuertes pendientes verticales en su interior, fruto del trabajo de extracción realizado durante años (Figura 10).



*Figura 10: Vista aérea de las canteras y la Ronda de Barrios.*

Además, esta zona se ha utilizado durante los últimos años como vertedero no legalizado, lo que ha contribuido aún más al degradado de la zona.

En total hay tres canteras diferentes que van a ser rehabilitadas en el ámbito de estudio y para su mejor reconocimiento han sido nombradas según se muestra en la Figura 11.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---



*Figura 11: Ubicación de las canteras de arcillas.*

Otra de las actuaciones antrópicas efectuadas en la zona ha sido la escombrera de los Algézares. Esta escombrera en desuso ha sido integrada en el paisaje cubriéndola con materiales impermeables, tierra y, posteriormente, vegetación. De esta forma, actualmente se observa un montículo que parece natural. La inclusión de la escombrera dentro del paisaje ha generado una nueva distribución de la dirección de las aguas. La zona situada al Oeste de la escombrera es la única que puede incluirse en la cuenca de estudio. Sin embargo, la zona Este desagua ahora en el exterior de la zona a analizar y la zona comprendida entre estas dos ha generado dos cuencas endorreicas que, por tanto, tampoco pueden incluirse en la zona de estudio.

La última actuación importante es la reciente construcción de la Ronda de Barrios. Su apertura en 2008 provoca que esta nueva vía de comunicación no aparezca reflejada en la cartografía y por ello, su influencia no queda reflejada en ella. La creación de nuevos pasos de agua frente al bloqueo de otros tiene como consecuencia la nueva distribución del flujo de agua y la eliminación de una franja de terreno que antes sí vertía en la cuenca. Este hecho supondrá la modificación manual del modelo de elevación digital para incorporar los nuevos pasos de agua.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE**

---

### **2.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

En este apartado se detallará la información meteorológica utilizada a lo largo del trabajo así como fuente de las mismas.

#### **2.2.1 Precipitación y temperatura**

Las series de precipitación y temperaturas utilizadas a lo largo de este trabajo se pueden dividir entre las utilizadas para la implementación del modelo hidrológico, las utilizadas para la obtención de los caudales de sedimentos en clima actual y las utilizadas para la obtención de los caudales de sedimentos en clima futuro.

Las primeras proceden del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) y se obtuvieron del trabajo de García García (2015). Concretamente, se obtuvo información en un pluviómetro localizado en la ciudad de Teruel, en las coordenadas UTM (660544, 4467886) y a escala 10 minutil. Las segundas proceden de la rejilla SPAIN02 (Herrera et al., 2016) (Kotlarski et al., 2017). Esto se trata de un conjunto de datos observacionales interpolados a escala diaria en una cuadrícula regular de 0.1° de entre los que se seleccionó el periodo 1971 a 2007. Existen distintas versiones de estas series de datos de las cuales se ha seleccionado la versión 5 rotadas y un único punto de la rejilla (grid3393) ya que éste ofrece una cantidad de datos observados de precipitación y temperatura suficiente para los objetivos del presente estudio.

Las últimas corresponden con un subconjunto de series extraídas del proyecto Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014). Éste consiste en una propuesta de generación de escenarios regionalizados de cambio climático en la península Ibérica y las Baleares utilizando técnicas estadísticas aplicadas a las salidas de los Modelos Globales de Cambio Climático (CGM) para aumentar su resolución. Esta información se encuentra en el mismo formato que la serie de SPAIN02, por tanto, se obtuvieron las series en el mismo grid3393.

La escala de los datos de precipitación a utilizar que proporcionan tanto los ficheros de SPAIN02 como los modelos de proyección climática de Euro-CORDEX, es a escala diaria.



## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

En la siguiente imagen se puede observar la localización del grid3393 de SPAIN02 utilizado, el punto de situación del pluviómetro con los datos del proyecto consultado y la cuenca de estudio con su punto de desagüe.

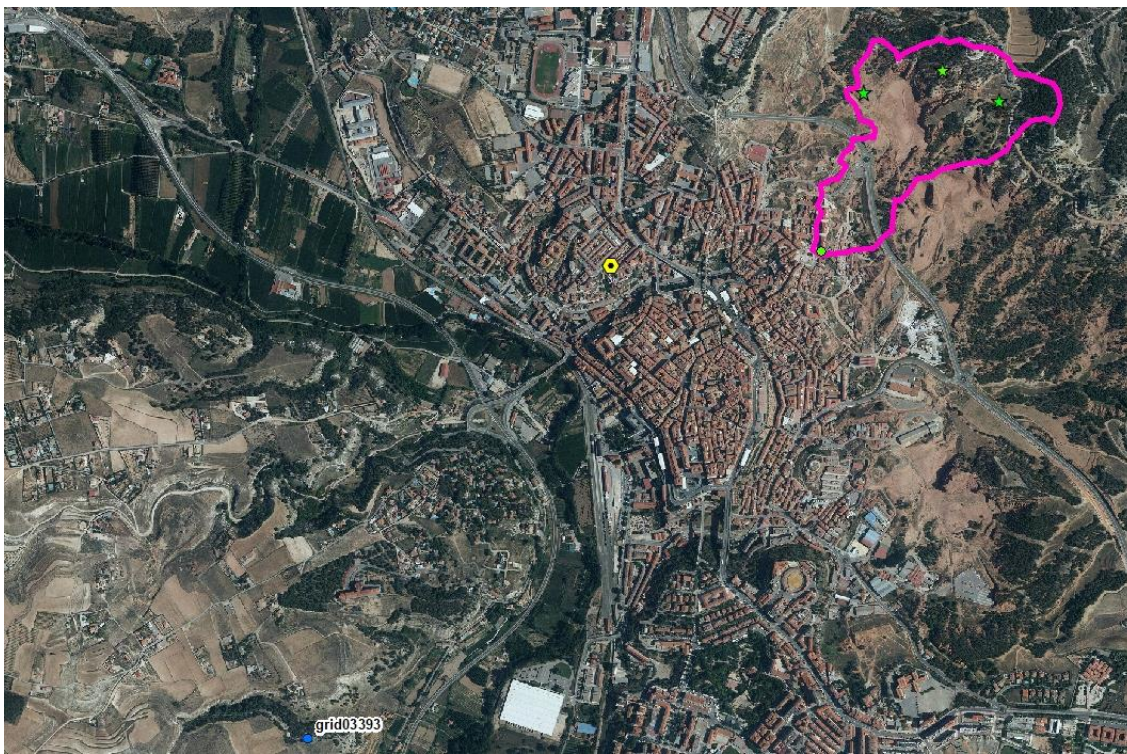


Figura 12: Mapa de situación de los puntos de toma de datos

### 2.2.2 Obtención y cálculo de la $ET_0$

La evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) se ha calculado según la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) Esta ecuación únicamente necesita datos de temperaturas, obtenidos del grid de SPAIN02; y de radiación solar, obtenidos según la tabla de radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998). La expresión general es la siguiente:

$$ET_0 = 0,0135 * (t_{med} + 17,78) * R_s$$

Donde  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia diaria (mm/día),  $t_{med}$  es la temperatura media (°C) y  $R_s$  es la radiación solar incidente (mm/día).

La radiación solar incidente,  $R_s$ , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como  $R_o$  o  $R_a$ , y su valor está tabulado en función de la latitud del lugar y del mes. En este documento nos referiremos a ella como  $R_o$ .

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

---

*Samani [2000]* propone la siguiente ecuación para la obtención de la radiación solar incidente:

$$R_s = R_0 * KT * \sqrt{(t_{max} - t_{min})}$$

Donde *KT* es un coeficiente adimensional, *t<sub>max</sub>* es la temperatura diaria máxima (°C) y *t<sub>min</sub>* es la temperatura diaria mínima (°C).

Puesto que los valores de *R<sub>0</sub>* están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta expresión la encontramos en el coeficiente *KT*.

El coeficiente *KT* de la expresión es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero *Hargreaves* recomienda *KT* igual a 0,162 para regiones del interior y *KT* a 0,19 para zonas costeras. Tomando para el coeficiente *KT* el valor medio de 0,17, resulta la expresión citada con más frecuencia en la bibliografía:

$$ET_0 = 0,0023 * (t_{med} - 17,8) * R_0 * \sqrt{(t_{max} - t_{min})}$$

Usando esta ecuación simplificada únicamente se necesitarían datos de temperatura obtenidos de las rejillas de precipitación de SPAIN02 como se ha comentado anteriormente.



---

## ***3. MODELO HIDROLÓGICO***

---





### **3. MODELO HIDROLÓGICO**

---

En este apartado se va a proceder a la implementación del modelo hidrológico y submodelo de sedimentos. En primer lugar, se realizará una descripción de tanto el modelo hidrológico distribuido utilizado (TETIS) como del submodelo de sedimentos que incorpora. Tras lo cual, se explicará detalladamente los pasos seguidos para sus respectivas implementaciones.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS**

En este proyecto se ha utilizado el modelo TETIS (Francés et al., 2007) que es un modelo hidrológico distribuido en el espacio capaz de modelar los distintos procesos físicos del ciclo hídrico como son precipitación, nieve, evaporación, evapotranspiración, escorrentía superficial, interflujo y flujo base. Es un modelo conceptual cuyos parámetros son físicamente basados. Además, este modelo utiliza una estructura efectiva de parámetros a partir de factores correctores, de los que se hablará en los próximos apartados, lo que implica el uso de un único parámetro para el conjunto de la cuenca y no un parámetro específico para cada celda, convirtiéndolo en un modelo parsimonioso.

En TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí, más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda.

El modelo se distribuye en el espacio usando una malla rectangular y en cada celda se modela el proceso de lluvia-escorrentía usando seis tanques verticales según la figura 13, donde cada tanque representa el almacenamiento del agua en una columna extendida del suelo: la nieve, intercepción, almacenamiento estático, almacenamientos superficiales, gravitacionales y acuífero. La relación entre los distintos tanques se basa en las características del suelo tales como capacidad del campo y las conductividades hidráulicas saturadas del suelo y el subsuelo.

Las conexiones verticales entre los tanques describen los procesos de: precipitación, fusión de la nieve, evapotranspiración, infiltración, percolación y pérdidas subterráneas. Por su parte, las conexiones horizontales describen el flujo superficial o escorrentía directa, el interflujo y el flujo base. En cualquier

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

caso, todos los procesos involucrados se simulan a través de ecuaciones simples y con pocos parámetros a estimar.

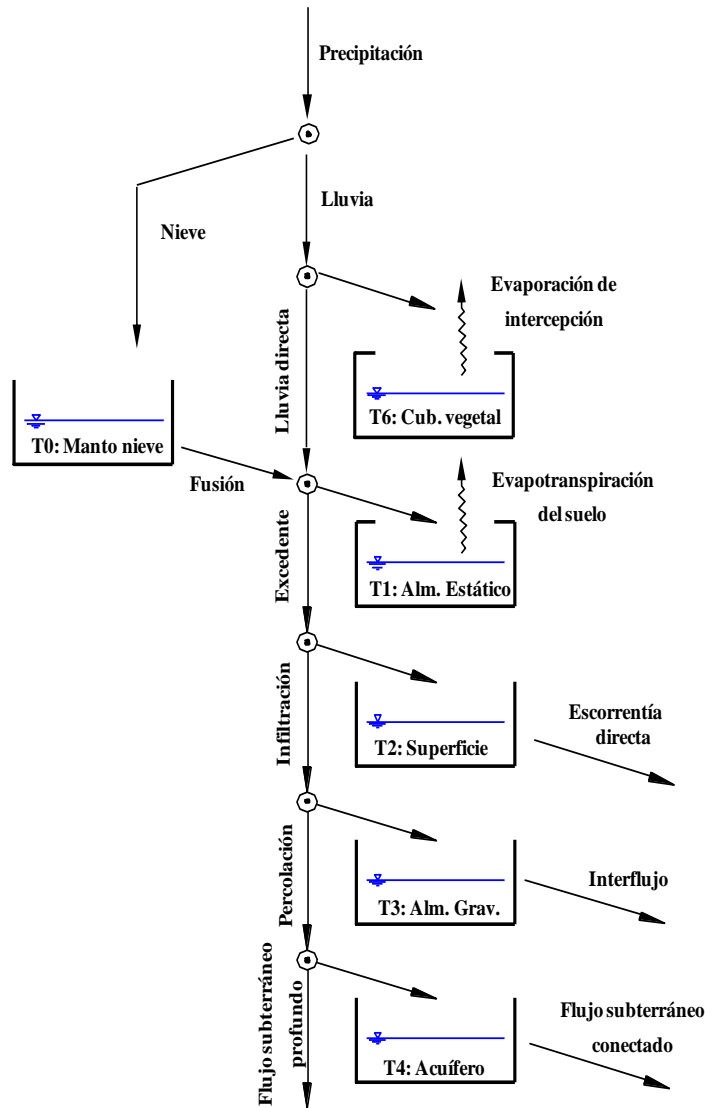


Figura 13: Esquema conceptual a escala de celda del modelo distribuido TETIS

Por otro lado, la conceptualización horizontal del modelo TETIS se trata de una malla interconectada en las tres direcciones. Los tres últimos almacenamientos drenan hacia los correspondientes tanques aguas abajo siguiendo las direcciones de flujo obtenidas a partir de modelo de elevación digital (DEM) hasta alcanzar la red de drenaje formada por cárcavas y cauces (Figura 14).

Así pues, podemos diferenciar entre tres elementos con comportamientos diferentes: la ladera, las cárcavas y el cauce. La ladera está definida por el área máxima para que el flujo superficial se concentre en una cárcava o un cauce. La escorrentía directa en ladera termina cuando se encuentra un canal, ya sea una

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

cárcava o un cauce. El inicio de las cárcavas coincide con el área necesaria para que el interflujo retorne a la superficie. El interflujo normalmente sale a la superficie cuando se encuentra con una hendidura permanente del terreno, la cual no lleva agua de forma permanente. Estas hendiduras, conocidas como cárcavas, marcan el comienzo del interflujo. La escorrentía superficial en las celdas con área de captación mayor que el área umbral para el interflujo y menor que el área umbral para el flujo base se da en cárcavas. Esta escorrentía superficial es la suma entre la escorrentía directa y el interflujo. Las celdas cauces están definidas por el área necesaria para que el flujo subterráneo en el acuífero alcance la superficie del terreno. El flujo base coincide con la presencia de cauces que permanentemente llevan agua. En las celdas con área de captación mayor que área umbral para el flujo base, el flujo total se presenta en cauces y es la suma de la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base.

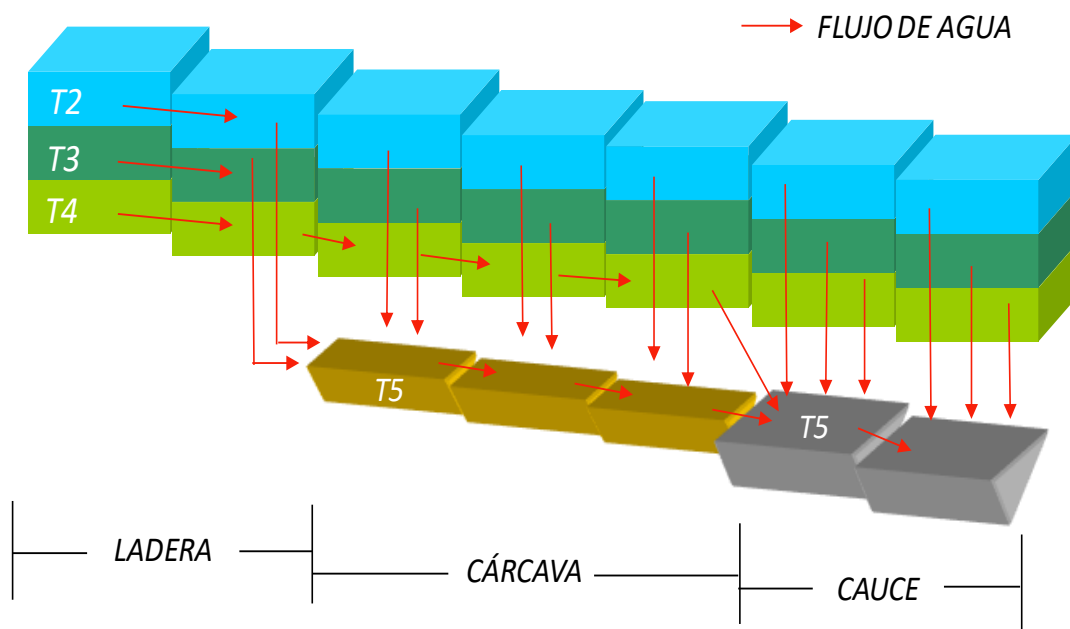


Figura 14. Conceptualización horizontal del modelo distribuido TETIS

La traslación del flujo a lo largo de la red de flujo hasta la salida de la cuenca se realiza empleando una combinación de las características geomorfológicas de la cuenca en combinación con el método de la onda cinemática conocida como onda cinemática geomorfológica OCG.

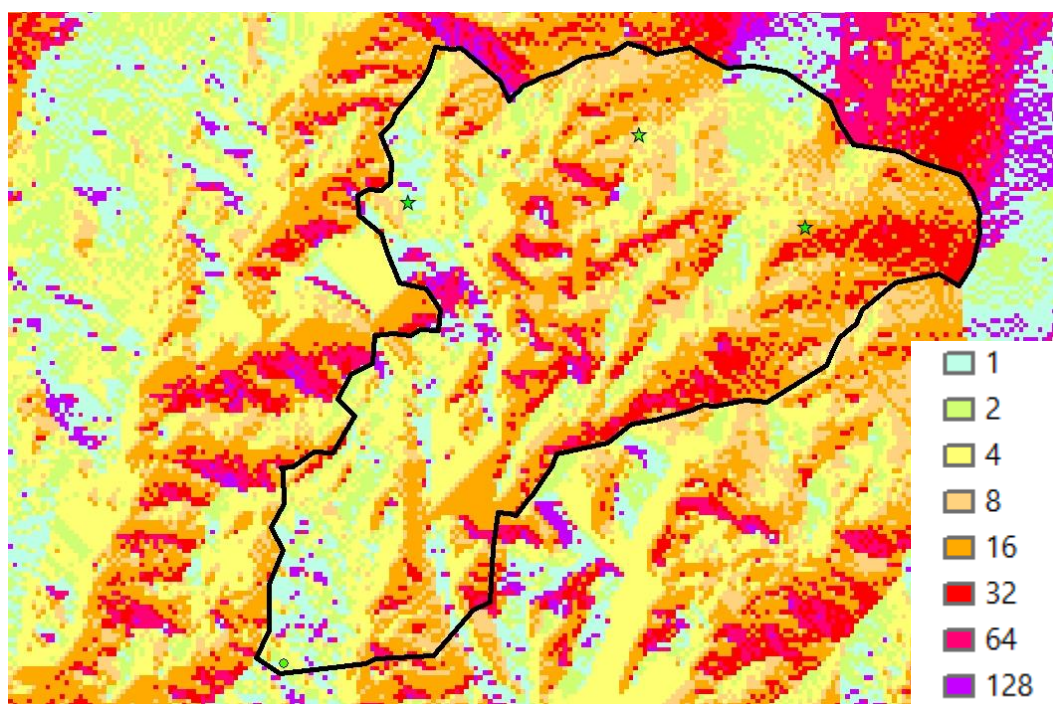
### 3. MODELO HIDROLÓGICO

## 3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

### 3.2.1 Estimación de mapas parámetros

Como se ha comentado en la descripción del modelo hidrológico es necesaria la preparación de la información espacial precisa. Habrá que introducir unos mapas que muestren las características y condiciones específicas de la zona de las que se ha hablado en el capítulo 2 de este trabajo. Estos mapas, utilizados como base del modelo hidrológico, se han obtenido de un proyecto anterior situado en la misma zona de estudio y del que se ha hablado en apartados anteriores.

Como modelo de elevación digital se utilizó el de trabajo de García García (2015), obtenido a su vez del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). A partir de este mapa y utilizando un software de gestión de información geográfica (GIS) se desarrollaron los mapas de dirección de flujo (Figura 15), mapa de celdas acumuladas, mapa de pendientes y mapa de velocidades de ladera, suficientes para la delimitación de la cuenca hidrográfica.



*Figura 15: Mapa de direcciones de flujo.*

El resto de mapas de parámetros necesarios para la implantación del modelo también han sido obtenidos del proyecto anteriormente citado.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

Estos mapas tienen un tamaño de celda de 25x25m. Dado el tamaño de nuestras parcelas de estudio (14x6m) y la extensión de la cuenca (0,28km<sup>2</sup>), habría sido recomendable para este proyecto la disminución de la escala espacial de estos mapas, sin embargo, debido a la gran cantidad de tiempo y recursos que requiere la obtención de estos mapas y, sobretodo, a la finalidad del presente trabajo (comparación de situación actual con posible futura), se tomó la decisión de proseguir a la misma escala espacial que en el trabajo de García García (2015).

#### 3.2.2 Calibración

Para poder llevar a cabo la calibración del modelo hidrológico se necesitan valores de aforo de caudal. En nuestro caso, al no presentarse caudales en la cuenca, es necesario buscar un método alternativo para la calibración del modelo. Es por ello que el método elegido para la calibración se basa en el ajuste de los caudales simulados con TETIS a los cuantiles de los caudales pico obtenidos mediante el método analítico conocido como Método Racional de Témez

El método de Témez es un método hidrometeorológico basado en la duración de la precipitación, la modelación de las abstracciones hidrológicas y la variabilidad temporal de precipitación. Además, este método tiene en cuenta la magnitud de la tormenta que genera la crecida en la obtención del coeficiente de escorrentía lo que permite una mayor precisión en los valores de caudal obtenidos.

$$Q = \frac{C * K_A * K * i(t_c) * A}{3.6}$$

Siendo:

$Q$  = caudal pico instantáneo en m<sup>3</sup>/s

$C$  = coeficiente de escorrentía

$K_A$  = coeficiente de reducción areal

$K$  = coeficiente de uniformidad temporal

$i(t_c)$  = intensidad media de la tormenta de diseño para el tiempo de concentración, en mm/h

$A$  = superficie de la cuenca en Km<sup>2</sup>

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

La intensidad de la tormenta de diseño se calcula para el intervalo más desfavorable de duración, que es el tiempo de concentración, obtenido según la siguiente expresión:

$$t_c = 0.3 * \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76}$$

Siendo:

$t_c$ = tiempo de concentración, en horas

$L$ = longitud del cauce principal de la cuenca, en Km

$J$ = pendiente del cauce principal

Se puede proceder entonces al cálculo de la intensidad mediante la expresión de la curva IDF propuesta por Témez:

$$i(t_c) = I_d * \alpha^{\frac{28^{0.1} - t_c^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

Siendo:

$I_d$ =intensidad media diaria, en mm/h, correspondiente al periodo de retorno considerado, cuyo valor es igual a  $P_d/24$

$P_d$ = precipitación diaria máxima anual, en mm, correspondiente al periodo de retorno considerado.

$\alpha$ = relación entre intensidad horaria y diaria, obtenido a partir de un mapa de isolíneas.

El coeficiente de escorrentía  $C$  define la proporción de intensidad de lluvia que genera escorrentía superficial y se obtiene teniendo en cuenta la magnitud de la precipitación  $P_d$  y el umbral de escorrentía  $P_0$  según la expresión:

$$C = \frac{(P_d - P_0) * (P_d - 23P_0)}{(P_d - 11P_0)^2}$$

Considerando el valor de  $P_0$  corregido por un parámetro  $\beta$  que refleja la posición relativa del intervalo de máxima intensidad dentro del pluviograma diario. Este coeficiente está regionalizado según estudios experimentales realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos [CEDEX, 1994].

El coeficiente de reducción areal  $K_A$  se introduce para tener en cuenta la no uniformidad espacial de la lluvia si la superficie de la cuenca de estudio es mayor que 1 Km<sup>2</sup> y tiene por expresión:

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15}$$

Siendo:

A= superficie de la cuenca en Km<sup>2</sup>

El coeficiente de uniformidad temporal K se utiliza para corregir globalmente el error introducido en la hipótesis de uniformidad temporal de la precipitación a medida que crece el tamaño de la cuenca y depende del tiempo de concentración según la siguiente expresión:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

Por último, el cálculo del volumen para el periodo de retorno seleccionado se obtiene en m<sup>3</sup> como:

$$V = \frac{(P_d * K_A - P_0)^2}{P_d * K_A + 4P_0} * A * 1000$$

Se cuenta con datos de precipitación del período 1996-2012 a escala 10 minutil utilizados en el estudio análogo que se ha tomado como recurso base de este trabajo. Como se ha comentado en el apartado 2 de este estudio, estos datos fueron obtenidos a través del SAIH a partir de un pluviómetro localizado en la ciudad de Teruel. Para la utilización de estos datos de precipitación, se ha visto la necesidad de transformarlos a escala diaria, esto es debido a una serie de motivos. Estos motivos son principalmente que el objetivo del proyecto es la evaluación de los procesos erosivos en la cuenca y, para ello, es preciso efectuar el análisis durante un periodo muy extenso en el tiempo por lo que utilizar datos a escala sub-diaria sería inviable. También se debe tener en cuenta que en España los periodos de lluvias más elevados son series de varios días con lo que al enfrentarnos al estudio de estos datos el entendimiento de ellos a escala diaria es más adecuado.

Además, los datos que se obtienen mediante el método de Témez son de carácter instantáneo mientras que los simulados con TETIS son a escala diaria. Por tanto, para poder realizar una comparación entre ambos es necesario la transformación de los datos diarios a instantáneos. Para esta transformación se ha decidido utilizar, en primera instancia, la formulación de Fuller (1914), la cual nos permite obtener un coeficiente de conversión  $Q_d/Q_i$  (caudal diario frente a instantáneo) a través de la siguiente fórmula.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

$$Q_{inst} = \left(1 + \frac{a}{A^b}\right) * Q_{med}$$

Para el cálculo de los parámetros  $a$  y  $b$  se utiliza un estudio llevado a cabo por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2011). El cuadro propuesto por esa institución (Tabla 1), propone coeficientes para cada región a las orillas de los distintos ríos de la península. En este caso, y al tratarse de Teruel una ciudad sin cauces cercanos, el valor del coeficiente  $Q_d/Q_i$  obtenido se muestra mayor de lo esperado, aproximadamente 35. Esto es así dado que se tienen referencias similares de la zona y esto permite conocer el valor al que se debe aproximar.

REGIÓN	a	b
<b>Miño-Sil + Galicia Costa</b>	1.81	0.23
<b>Cantábrico + C.I. País Vasco</b>	3.1	0.26
<b>Duero</b>	1.78	0.29
<b>Tajo</b>	5.01	0.38
<b>Guadiana + Guadalquivir</b>		
- Zona 1	35.89	0.72
- Zona 2	112.82	0.7
- Zona 3	11.56	0.42
<b>Júcar</b>	20.87	0.51
<b>Segura</b>	145.85	0.75
<b>Ebro</b>		
- Zona 1	2.49	0.36
- Zona 2	3.39	0.29
- Zona 3	37.73	0.55

Tabla 1: Parámetros de las ecuaciones de Fuller (CEDEX).

Se ha decidido, por tanto, proponer un segundo método más específico de la zona en la que se ha realizado este trabajo para intentar una aproximación a un valor más real. Para ello, se contaba con un estudio muy novedoso realizado recientemente, concretamente en Teruel mediante la herramienta IBER.

IBER es un modelo hidráulico bidimensional muy reciente en el que se introducen datos de precipitación y, en función de la rugosidad del terreno, determina los caudales de salida. De esta forma se ha obtenido un nuevo coeficiente  $Q_d/Q_i$  que ha resultado ser más adecuado para realizar la transformación.



### 3. MODELO HIDROLÓGICO

Una vez obtenidos todos los “*inputs*” para la calibración del modelo se ha creado un evento en el modelo hidrológico de TETIS. En este evento se incluye el periodo de ocurrencia (1996-2012), los datos de caudales aportados por Témex y las precipitaciones observadas.

Tras la creación del evento, el modelo hidrológico TETIS nos ofrece como parámetros los factores correctores del modelo relativos al almacenamiento estático (FC1), evapotranspiración (FC2) e infiltración (FC3). Ha sido necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad que permita discernir que parámetros influyen en mayor o menor medida a las variaciones de los resultados del modelo.

Este análisis se ha llevado a cabo a partir de una serie de iteraciones que iban concretando cada uno de los tres parámetros anteriores para el caso de estudio. Sin embargo, ha sido necesario partir de una serie de valores próximos a aquellos buscados a través de las iteraciones, es por ello que se ha tomado como referencia una cuenca próxima a la de estudio, conocida como “*El Poyo*”, que aporta el orden de magnitud de los parámetros iniciales con los que iniciar las series de iteración.

A partir de los parámetros alcanzados tras el análisis, se han podido ajustar los caudales generados a los valores de caudal aportados por el método de Témex como se muestra en la gráfica (Figura 16).

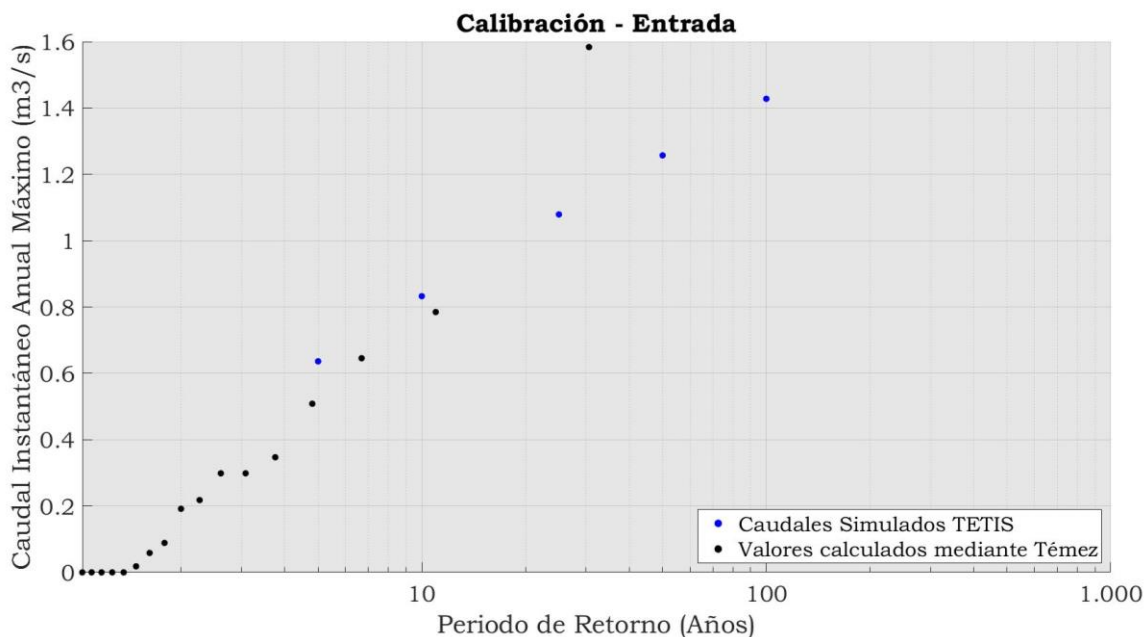


Figura 16: Gráfica comparativa entre caudales generados y Témex.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

Los factores correctores finales y que generan los caudales anteriores más próximos al Método Racional de Témez son los siguientes:

<b>Almacenamiento estático (FC1)</b>	<b>Evapotranspiración (FC2)</b>	<b>Infiltración (FC3)</b>
1	1,2	0,5

*Tabla 2: Factores correctores para los que se ajusta el modelo hidrológico TETIS*

#### 3.2.3 Validación

En cuanto a la validación que permita establecer como adecuado el proceso de calibración anterior, no se tiene información suficiente que permita alcanzar este fin. Sin embargo, cabe destacar que el objetivo principal de este estudio es la comparativa de las pérdidas de suelo en la zona durante un extenso período de tiempo, por lo que una perfecta calibración del modelo no se considera el objetivo principal del trabajo. Debido a ello, se ha tomado como válida la calibración del modelo hidrológico realizada anteriormente.

### 3.3 DESCRIPCION DEL SUBMODELO DE SEDIMENTOS

El modelo utilizado en este estudio es el submodelo de sedimentos que está integrado en el modelo hidrológico TETIS ya utilizado en el apartado anterior. Este modelo discretiza el área de estudio y la divide en tres zonas: ladera, cárcava y cauce. Para poder representar el ciclo de sedimentos en cada uno de sus zonas utiliza la ecuación de Julien (1995) para laderas y la de (Engelund and Eggert, 1967) para cárcavas y cauces, que se explicarán en el siguiente apartado.

El submodelo del ciclo de sedimentos de TETIS está adaptado del modelo CASC-2D de la “Colorado State University”. El modelo CASC-2D es un modelo hidrológico y de sedimentos a escala de evento que reproduce los procesos en dos dimensiones, donde la aproximación en cauce es unidireccional. En la adaptación de TETIS, ambos procesos son unidimensionales.

Una vez que la partícula ha sido erosionada, empieza a formar parte del flujo, y es transportada aguas abajo. Una partícula que pasa por una sección de control en un cauce ha sido erosionada, necesariamente, aguas arriba y

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

transportada por el flujo (Einstein, 1951). Einstein (1964) también afirmó que, por tanto, las dos condiciones que deben limitar el ratio de transporte de sedimentos son la capacidad de transporte del flujo y el material disponible en la cuenca.

Por otro lado, el submodelo de sedimentos de TETIS separa las partículas de sedimento en tres categorías, arena, limo y arcilla.

<b>Clase</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Velocidad (mm/s)</b>
Arena	0,35	36
Limo	0,016	0,22
Arcilla	0,001	0,00086

Tabla 3: Parámetros usados en TETIS

Esta división se hace porque la velocidad crítica experimental depende del tamaño de grano, siendo pequeña para la arcilla suspendida y limo, y alta para arena y grava (Rojas, 2002). Esto es importante para predecir el movimiento de los diferentes tamaños de partículas.

Como se ha comentado anteriormente el submodelo de sedimentos de TETIS divide la zona de estudio en ladera, cárcava y cauce por lo que en cada una de las situaciones el modelo utiliza una serie de ecuaciones y procedimientos que se pueden consultar en el manual del modelo. Además, la calibración del submodelo de sedimentos se lleva a cabo ajustando tres parámetros correspondientes a la capacidad de transporte en cada una de las tres situaciones posibles, ladera ( $\alpha$ ), cárcava ( $\beta_1$ ) y cauce ( $\beta_2$ ).

#### **3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SUBMODELO DE SEDIMENTOS**

A lo largo de este apartado va a efectuarse la implementación del submodelo de sedimentos en la cuenca de análisis. Los resultados proporcionados por el modelo permitirán deducir las áreas que están sometidas a pérdida de suelo y en las que se produce mayor depósito de sedimentos.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

#### 3.4.1 Estimación de mapas de parámetros

Para la implementación del submodelo de sedimentos TETIS es necesaria la preparación de la información espacial precisa. El submodelo de sedimentos requiere la introducción de unos mapas que muestren los porcentajes de textura del suelo y los mapas correspondientes a los factores de la USLE (K, C y P).

Estos mapas, nuevamente, han sido obtenidos a partir de García García, (2015). Estos mapas se obtuvieron a través de un minucioso estudio de campo con toma de muestras. Como se ha comentado anteriormente habría sido recomendable para este proyecto la obtención de los mapas con nuevas visitas de campo que permitieran la creación de unos nuevos mapas de resolución 5x5m.

Se determinan, a continuación, los valores de los mapas de factores de la USLE. El factor P viene referido a las prácticas de conservación y expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando una cierta práctica y la que se perdería labrando según la máxima pendiente. Como el estudio no aborda las diferentes prácticas de conservación no hay que considerar los efectos de este parámetro y se le asigna un valor constante de 1.

Los factores K y C representan, respectivamente, la erosionabilidad del suelo y el cultivo y manejo de suelo. Se obtienen a partir de los mapas anteriores de textura del suelo, así como de los usos del suelo. El factor K representa la respuesta del suelo a una determinada fuerza o mecanismo erosivo y se obtiene a través de la expresión de Wischmeier (Wischmeier and Smith, 1961).

$$100 * K = [10^{-4} * 2.71 * T^{1.14} * (12 - MO)] + 5.2(E - 2) + 3.2(P - 3)$$

Con K expresado en  $\frac{t \cdot m^2 \cdot h}{ha \cdot hJ \cdot cm}$

Siendo *T*: Parámetro de textura de 15cm superficiales, obtenido como:

$$T = [(100 - Ac) * (L + Armf)]$$

*Ac* =porcentaje de arcilla [ $<0.002mm$ ]

*L + Armf*= porcentaje de limo y arena muy fina [0.1-0.002mm]

*MO*= porcentaje del contenido en materia orgánica

*E*= parámetro de estructura

*P*= parámetro de permeabilidad

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

Por otro lado, el factor C tiene en cuenta la eficacia de los cultivos para proteger el suelo y se obtiene asignando a cada uso del suelo el valor propuesto por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (Almorox et al., 1994).

UNIDAD	FACTOR C
ZONA URBANA	0
CULTIVOS DE SECANO	0,25
ZONAS DE AGRICULTURA Y VEGETACIÓN NATURAL	0,04
BOSQUE DE CONÍFERAS	0,12
BOSQUE DE TRANSICIÓN Y MATORRAL	0,2
VEGETACIÓN DISPERSA	0,7

Tabla 4: Factor C según zona.

Por tanto, los valores finales recogidos de los factores C y K son los siguientes:

	FACTOR K	FACTOR C
MÍNIMO	0,167	0
MÁXIMO	0,638	0,7
MEDIA	0,276	0,326
DESV. EST.	0,102	0,269

Tabla 5: Valores de los factores K y C.

#### 3.4.2 Calibración

Igual que en la calibración del modelo hidrológico, la calibración del submodelo de sedimentos se efectúa comúnmente por comparación de datos de aforo de sedimentos. Como en el caso de la calibración del modelo hidrológico, en este estudio no disponemos de esos valores y es por ello que para esta calibración se ha utilizado el modelo que proporciona la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

La USLE es el modelo de estimación de pérdida de suelo con mayor aceptación y de más amplia aplicación debido, en gran parte, a su fácil manejo;

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

pero se deben considerar las restricciones del modelo para evitar errores en la interpretación de los datos obtenidos. Se trata de un modelo paramétrico totalmente empírico y su bondad depende del rigor con el que los cinco multiplicandos que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio. Sus parámetros no tienen realidad física; se trata de una formulación empírica que pretende interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. La evaluación de los parámetros es exclusivamente experimental, por lo que su capacidad de extrapolación se ve limitada cuando se intenta utilizar en zonas con condiciones ambientales diferentes. Además, sólo evalúa la pérdida de suelo producida por la erosión hídrica producida en ladera, sin considerar las formas de erosión en cárcavas y cauces, razón por la que puede realizarse la comparación con el modelo TETIS de sedimentos.

La formulación de la USLE estima las tasas anuales de erosión y es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Siendo:

*A*: Pérdida de suelo (t/ha·año)

*R*: Erosividad de las precipitaciones

*K*: Erosionabilidad del suelo

*L*: Longitud de ladera

*S*: Pendiente de la ladera

*C*: Cultivo y manejo del suelo

*P*: Prácticas de conservación

Los factores de erosionabilidad (*K*) y de cultivo y manejo del suelo (*C*) ya han sido calculados previamente. El valor del factor *P* se considera igual a la unidad en toda la cuenca, puesto que no van a analizarse diferentes prácticas de conservación.

El factor de erosión de la lluvia *R* es un indicador de la capacidad erosiva de una tormenta. Es un factor muy complejo de calcular, ya que se necesitan muchos datos que normalmente no están disponibles. Se ha utilizado, por tanto, un mapa de representación de isolíneas del ICONA para la Península Ibérica mostrado en la figura 17. Adoptándose un valor de 100 para la zona de Teruel.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO



Figura 17: Isolíneas del factor R (ICONA)

El factor de longitud de ladera L y el factor de pendiente de ladera S suelen calcularse de forma conjunta en un factor denominado factor topográfico LS el cual se ha determinado a partir de la tabla elaboradas por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid que vemos a continuación.

#### PENDIENTES (%) FACTOR LS

<b>0-3</b>	0,3
<b>3-12</b>	1,5
<b>12-18</b>	3,4
<b>18-24</b>	5,6
<b>24-30</b>	8,7
<b>30-60</b>	15,6
<b>60-70</b>	20,2
<b>70-100</b>	25,2
<b>&gt;100</b>	28,5

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

*Tabla 6: Valor LS en función de la pendiente.*

Una vez obtenidos todos los factores que intervienen en la formulación de la USLE se ha obtenido el valor final de erosión de la cuenca de estudio y a partir del cual se ha calibrado el submodelo de sedimentos. La pérdida total de suelo según la formulación de la USLE en el periodo de 1996 a 2012 es de 105,37 t/ha\*año.

A partir de este valor y llevando a cabo las iteraciones pertinentes se han podido ajustar los factores correctores del modelo de sedimentos. Como se ha comentado anteriormente la formulación de la USLE solo utiliza el factor de capacidad de transporte en ladera por lo que ese es el único valor que se buscaba con las iteraciones. Los factores correctores de capacidad de transporte en cárcavas y en cauces necesarios en el modelo de sedimentos de TETIS se han fijado en base a la información previa que se tiene de la zona de estudio. Por tanto, los valores finales utilizados en el submodelo de sedimentos de TETIS tras su calibración son los que podemos ver en la siguiente tabla.

<b>Fsed1 (ladera)</b>	<b>Fsed2 (cárcava)</b>	<b>Fsed3 (cauce)</b>
0.0028	0.198	1

*Tabla 7: Valores de los factores correctores para el submodelo de sedimentos TETIS.*

Tras obtener todos los factores y llevar a cabo la calibración se ha desarrollado un mapa que recoge la pérdida de suelo media anual por hectárea en el periodo de 17 años utilizado y que se muestra a continuación.



### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

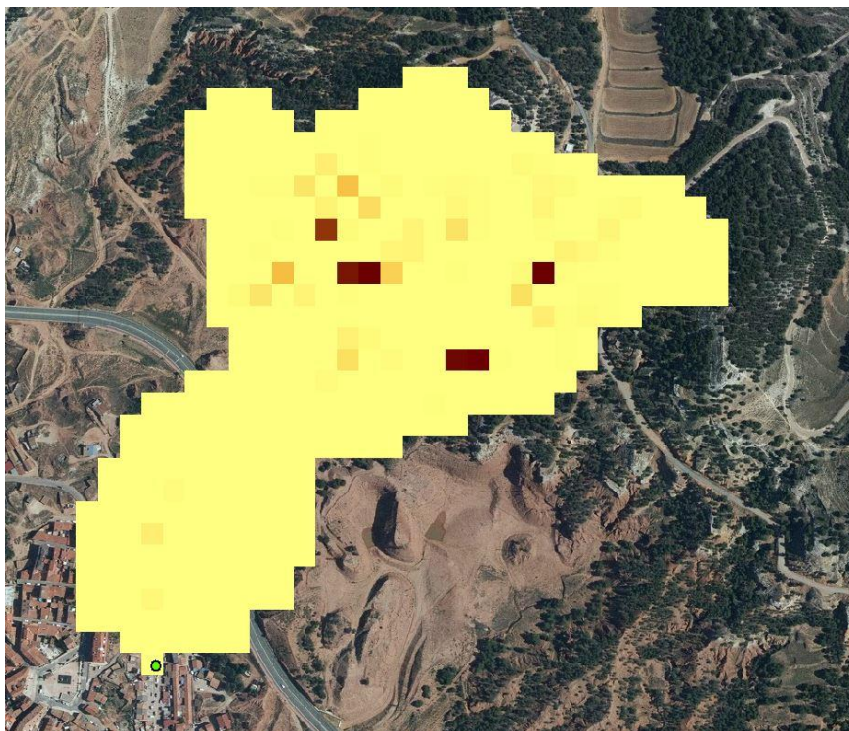


Figura 18: Mapa de pérdida de suelo en la cuenca de estudio.

#### 3.4.3 Validación

En el caso del submodelo de sedimentos sí que es posible realizar una validación del proceso de calibración utilizado en el apartado anterior. Esto se debe a que a través de las parcelas experimentales a las que se tiene acceso en la zona de estudio se ha realizado una medición de la pérdida de suelo de los últimos 5 años.

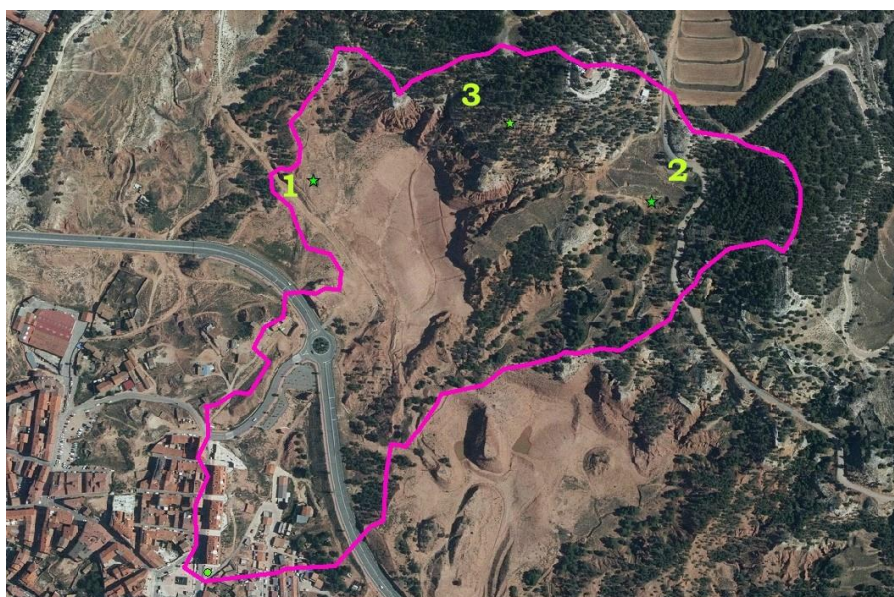


Figura 19: Localización de las parcelas experimentales.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO

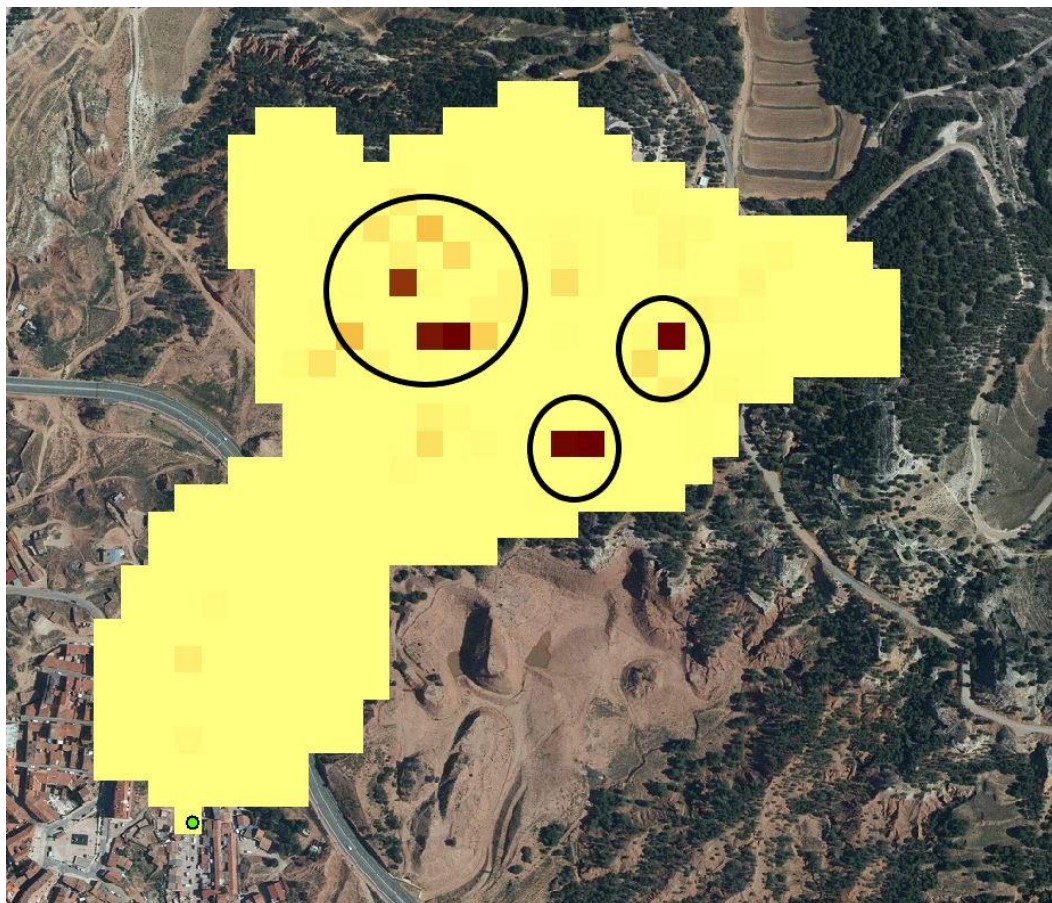
---

Las parcelas experimentales se encuentran localizadas según el mapa de la figura 19. Además, como se puede observar en el siguiente mapa (Figura 20) las zonas expuestas a mayor erosión coinciden en su mayoría con la localización de las parcelas experimentales.

La parcela 1 es en la que se ha desarrollado mayor pérdida de suelo dado que se encuentra en una zona sin vegetación y que al ser parte de una antigua cantera de arcillas fomenta que se produzca una erosión de esa magnitud.

La parcela 2 también muestra bastante pérdida de suelo dado que se encuentra en una zona de grandes pendientes como pudimos ver en el capítulo 2 (Figura 20) y con no mucha vegetación.

La parcela 3, al contrario que las dos anteriores, muestra una erosión nula debida principalmente a la cubierta vegetal que la protege.



*Figura 20: Localización de las mayores zonas de erosión de la cuenca.*

Además, tenemos la medición de la erosión en la parcela 2. Esta medición es de 20 mm aproximadamente según se puede comprobar en la figura 22. Teniendo en cuenta que esta erosión se debe a un periodo de unos 5 años,



### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---

llevando a cabo los cálculos pertinentes, se alcanza un valor de 88 t/ha\*año de erosión en la parcela de estudio. Este valor de erosión observada ha sido posteriormente comparado con el valor de la USLE a partir del cual hemos calibrado 105,37 t/ha\*año lo que implica que la calibración llevada a cabo es válida.

A continuación, mostramos una imagen de la parcela experimental y de la muestra a partir de la que hemos medido los 20 mm de variación. En esta imagen se aprecia en distintas piezas de suelo la erosión que ha producido que se destapan dichas piezas.



*Figura 21: Parcela experimental 2.*



### 3. MODELO HIDROLÓGICO

---



*Figura 22: Muestra a partir de la que se ha tomado la medición de erosión.*

---

## ***4. GENERADOR METEOROLÓGICO***

---



#### 4. GENERADOR METEOROLÓGICO

---

Como se comentó brevemente en el apartado 1.3, las series disponibles de precipitación y temperatura no son lo suficientemente largas para los objetivos de este estudio, por ello se ha visto la necesidad de recurrir a técnicas capaces de alargar estas series de forma sintética.

La finalidad de generar series muy largas de precipitación, en este caso 1000 años, es realizar un análisis de sensibilidad. Este análisis se traduce en el estudio de series de precipitación simuladas agrupadas en bloques de 100 años, de esta forma es posible observar las variaciones que se producen en las medias de cada uno de estos paquetes. En el caso de alcanzar una variación considerable en las medias de los bloques se considera necesario prolongar el estudio a un periodo que abarque esas variaciones.

Tomada la decisión de la necesidad de crear series de 1000 años se ha realizado una investigación acerca de la mejor forma de proceder y se ha decidido utilizar un generador meteorológico. Dado el nivel de estudio de este trabajo, podría considerarse innecesario el uso de un generador meteorológico de series continuas debido a que sería posible llevarlo a cabo estudiando tormentas aisladas. Sin embargo, los generadores estocásticos de tormentas aisladas conllevan el problema de que únicamente aportan valores individuales de una tormenta concreta y no proporcionan información adicional de los eventos ocurridos en momentos anteriores a esa tormenta aislada. Además, en los generadores de tormentas aisladas no se dispone de información de la humedad inicial del suelo que, en el caso de estudio de procesos erosivos como es el actual, es muy importante.

Como se ha comentado anteriormente, en este estudio es de vital importancia conocer la información acerca de un largo periodo de tiempo para poder evaluar la erosión adecuadamente y no sería acertado utilizar datos de tormentas individuales. Es por ello que se ha decidido utilizar un generador continuo estocástico.

En este capítulo se va explicar el razonamiento detrás de la elección del generador meteorológico estocástico y finalmente se llevará a cabo la calibración de éste.

### 4.1 SELECCIÓN DEL GENERADOR METEOROLOGICO

Una vez demostrada la conveniencia de la utilización de un generador meteorológico frente a un generador de tormentas aisladas es necesario elegir un generador meteorológico que se adecúe al caso de estudio de forma que nos facilite la información deseada.

Tras llevar a cabo una investigación sobre los principales generadores meteorológicos diarios existentes y atendiendo a la comparación llevada a cabo, Mehan et al., (2017) entre todos los generadores comparados se decidió escoger el generador MulGETS (Chen et al., 2012). Además, se decidió incorporar en el estudio el generador GWEX (Evin et al., 2018) ya que éste trata de abordar el problema de la subestimación de extremos mediante el ajuste de una función de distribución de cola pesada (E-GPD). Se realizaron varias comprobaciones (Figura 23) y se verificó que, efectivamente, el generador GWEX reproducía mejor las precipitaciones que el generador MulGETS en nuestra área de estudio, por tanto, fue el modelo elegido para proseguir el trabajo.

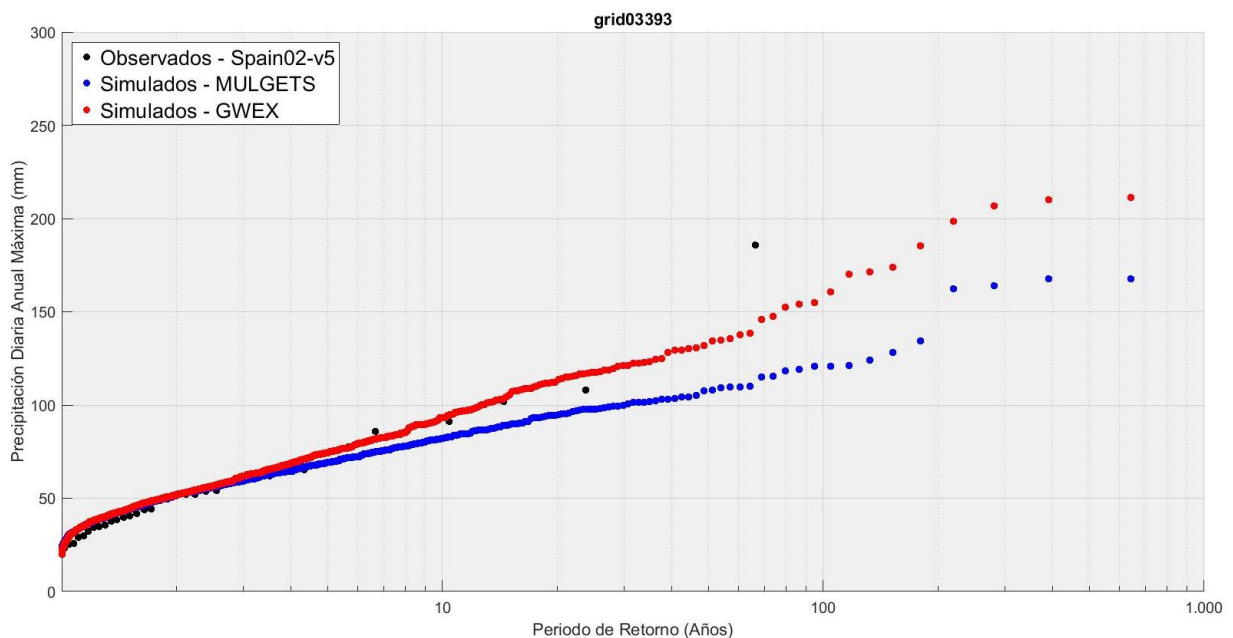


Figura 23: Comparativa en periodo de 1000 años del generador GWEX frente a MulGETS.

El generador meteorológico estocástico GWEX sigue el modelo de Wilks<sub>7</sub> (1998) en el que la probabilidad de ocurrencia y la cantidad de precipitación se modelan separadamente. La probabilidad de ocurrencia sigue una cadena de Markov de orden 4 diferenciando entre 1 para días con lluvia y 0 para días secos. La dependencia espacial de estos estados de precipitación se modeliza mediante



## 4. GENERADOR METEOROLÓGICO

---

un proceso estocástico Gaussiano a partir del número de estaciones. La distribución marginal utilizada para ajustar la cantidad de precipitación es la Extended Generalised Pareto Distribution (E-GDP) (Papastathopoulos and Tawn, 2013) que ha sido demostrada en diversos trabajos más eficiente para captar y reproducir los valores asociados a la parte alta de la función de distribución. La dependencia espacial y temporal de estas cantidades de precipitación se representa utilizando un modelo autoregresivo multivariado de orden 1 (MAR (1)). Para este caso de estudio, es necesario calibrarlo correctamente. Se va a llevar a cabo una descripción esquemática del proceso realizado por el generador GWEX en la simulación de lluvias. En GWEX se asigna a cada localización una precipitación acumulada durante el día y dependiendo de si la localización es seca o húmeda se le asigna un valor de 0 o 1 respectivamente. Además el generador tomará una variable para diferenciar entre los días de precipitación nula respecto del resto y por tanto creará una secuencia de probabilidad de tener un día de lluvia dependiendo de estados anteriores de precipitación. La dependencia espacial de los estados de precipitación la modela utilizando un proceso estocástico Gaussiano a partir del número de estaciones. GWEX entonces genera modelos de la cantidad de precipitación tomando la información anterior, distribuciones marginales de cola pesada y autocorrelaciones en los procesos temporales.

De esta forma se ha llevado a cabo la calibración del generador para poder proseguir con el siguiente apartado de modelos climáticos.

### **4.2 CALIBRACION DEL GENERADOR METEOROLÓGICO**

Una vez elegido el generador meteorológico, el siguiente paso es calibrarlo, es decir, obtener los valores de los parámetros. Esta calibración se repetirá en tres ocasiones: para clima actual y para las dos proyecciones de clima futuro que se verán en el siguiente capítulo

En los tres casos, la calibración del generador meteorológico se ha realizado, únicamente, con los valores de la precipitación observada; Spain02-v5 en el caso de clima actual (37 años): y las proyecciones de Euro-CORDEX (30 años cada una).

Cabe decir que, a pesar de que únicamente necesitamos generar series de precipitación sintética en el grid03393, para la calibración del generador se

#### 4. GENERADOR METEOROLÓGICO

introdujeron un total de 9 puntos de la rejilla, el correspondiente al grid03393 y los 8 puntos de la rejilla más cercanos (Figura 24), pudiendo captar así las correlaciones espaciales tanto de la probabilidad de ocurrencia y la cantidad de precipitación y, por tanto, mejorando la eficiencia del generador.

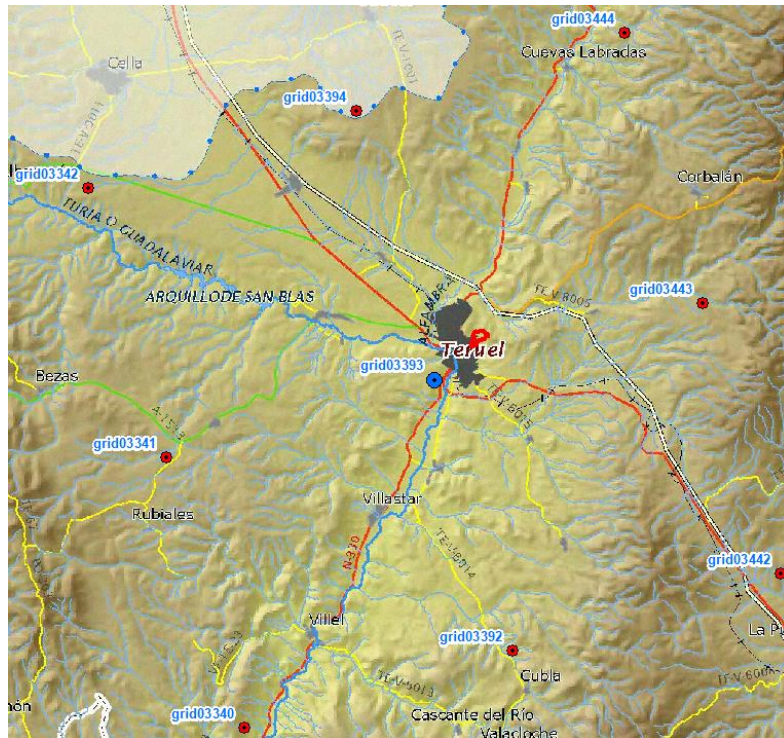


Figura 24: Grids utilizados en la calibración del generador meteorológico.

Todos los parámetros necesarios tanto como los asociados a la probabilidad de ocurrencia como a la cantidad de precipitación, así como ambas correlaciones temporales y espaciales fueron calculados para los nuevos puntos del grid y para cada mes del año.

---

# **5. *MODELOS CLIMÁTICOS***

---



## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

En este capítulo se va a llevar a cabo un proceso de elección de los datos de proyecciones climáticas más adecuado según la necesidad de este trabajo. También se llevará a cabo una corrección de sesgo de la proyección elegida.

Estas proyecciones climáticas han sido extraídas del proyecto Euro-CORDEX que es parte de un programa más amplio de marca internacional conocido como CORDEX y patrocinado por el *World Climate Research Program* (WRCP) y creado para organizar un marco de referencia internacional que produzca proyecciones a nivel regional mejoradas de todas las zonas del planeta.

### 5.1 SELECCIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO

Como se ha explicado anteriormente, se han utilizado datos de precipitación de los modelos desarrollados por el proyecto CORDEX. Este proyecto ha desarrollado modelos de proyección climática de toda la península y en este trabajo se han utilizado las proyecciones del punto más próximo a la cuenca de estudio, en concreto tratamos con 11 proyecciones o modelos climáticos (Tabla 8). A partir de estos 11 modelos se han llevado a cabo distintas cribas con el objetivo de alcanzar cual de esos modelos se ajusta más a los valores proporcionados por la cuenca de estudio.

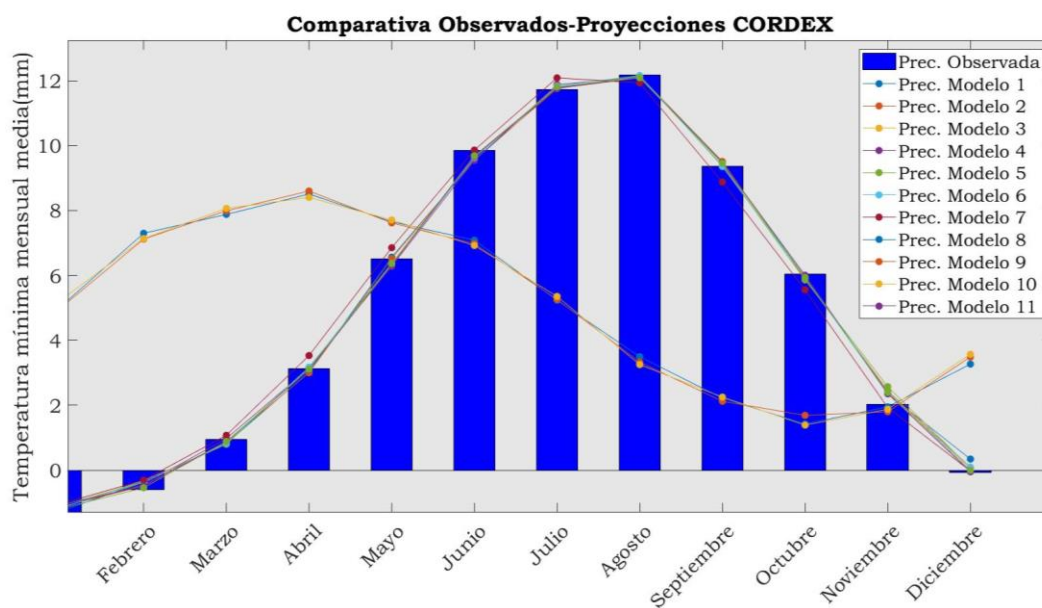
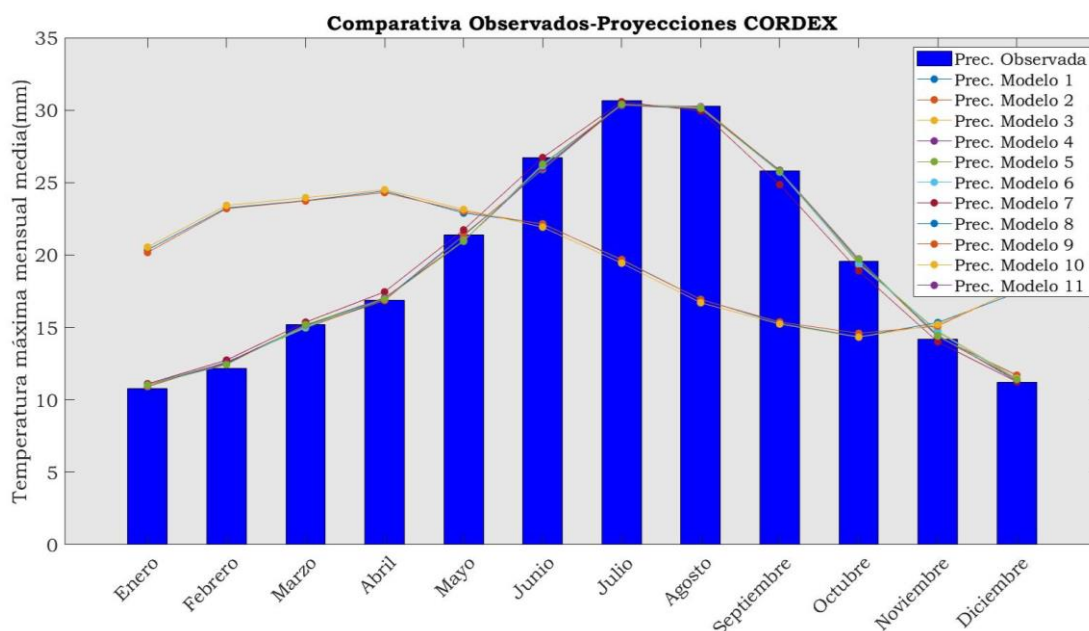
MODELO	MODELO GLOBAL	MODELO REGIONAL
1	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1
2	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	RCA4_v1
3	ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	RACMO22E_v1
4	ICHEC-EC-EARTH_r3i1p1	HIRHAM5_v1
5	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1
6	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1
7	IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	RCA4_v1
8	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1
9	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RACMO22E_v1
10	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RCA4_v1
11	MPI-ESM-LR_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1

## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

Tabla 8: Modelos climáticos proporcionados por el proyecto CORDEX.

De cada uno de los modelos anteriormente mencionados se ha extraído y clasificado la información relativa a precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas y porcentaje de días secos y ha sido a partir de estos datos que se han creado una serie de gráficas comparativas de los modelos.

Tras presentar la comparativa de las 11 proyecciones, aparecen claramente tres modelos cuyos comportamientos difieren de forma brusca con los datos observados en la cuenca (Figura 25).



## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

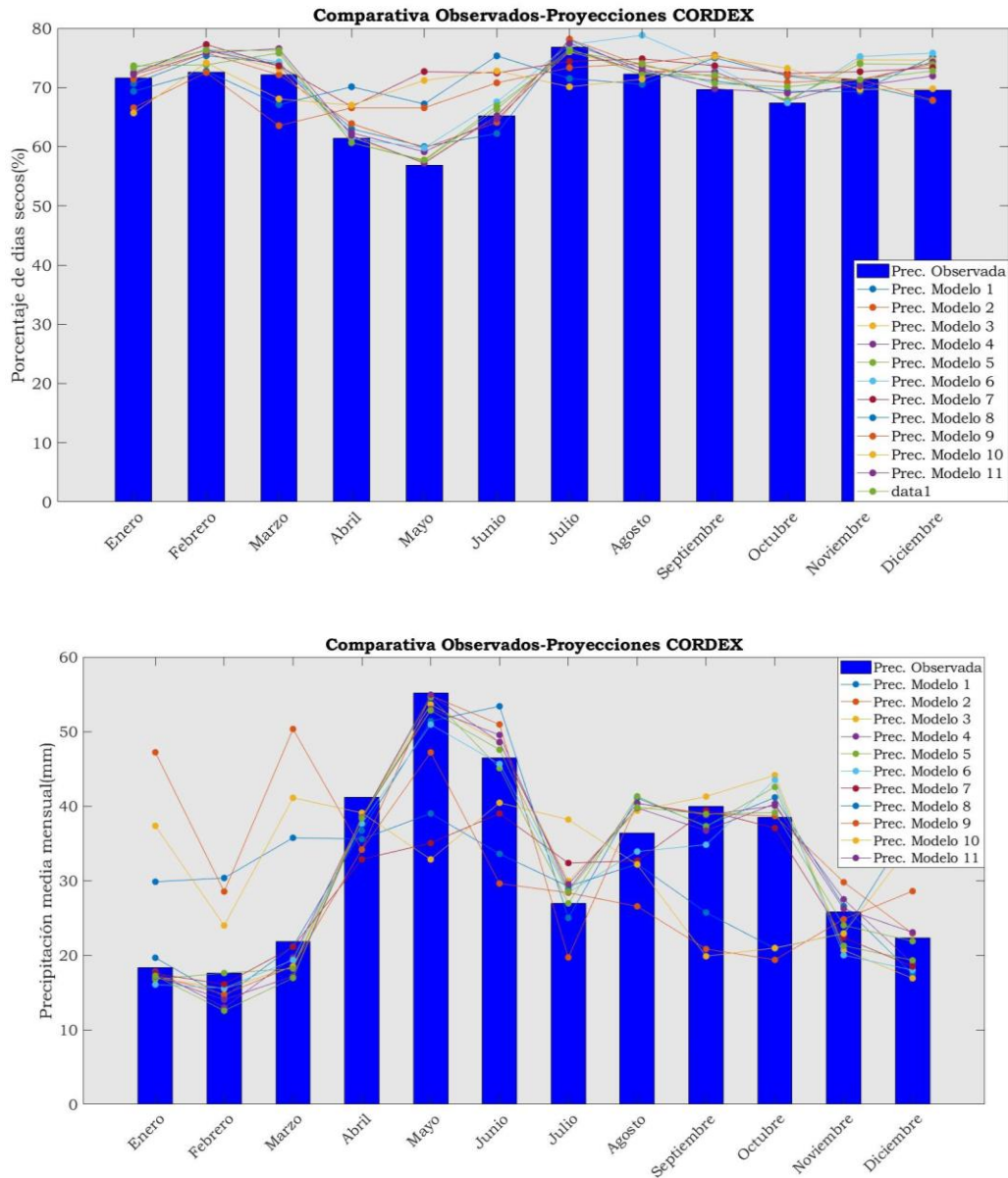


Figura 25: Gráficas comparativas de los 11 modelos climáticos en temperatura máxima, temperatura mínima, porcentaje de días secos y precipitaciones.

Tras descartar estos tres modelos climáticos se ha decidido fijarse únicamente en las variaciones de las gráficas de precipitación y porcentaje de días secos dado que son los datos más relevantes para este estudio y, además, en las gráficas de temperatura apenas se observan cambios entre modelos climáticos una vez descartados los 3 modelos anteriores.

## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

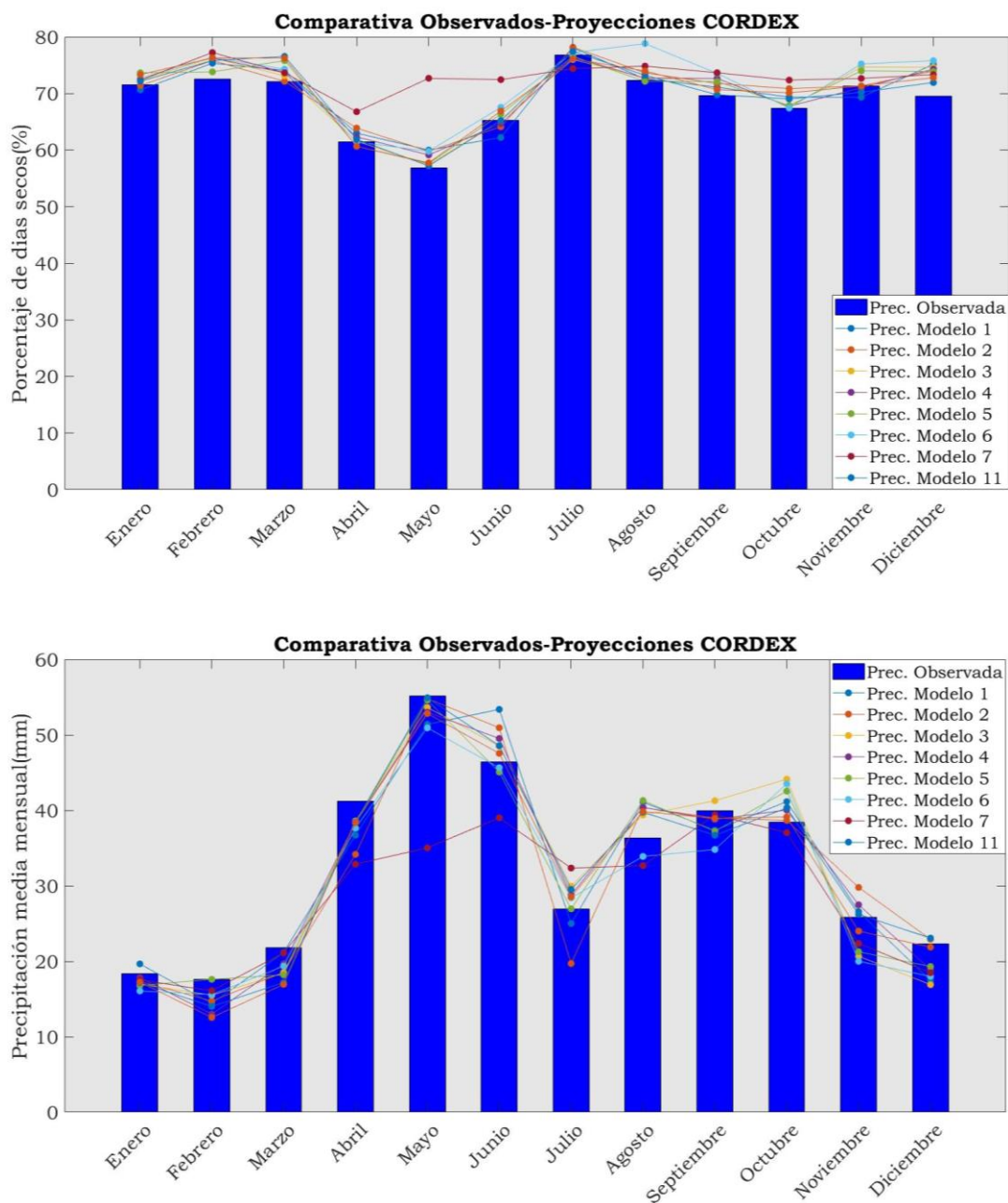


Figura 26: Comparativa de 8 modelos climáticos en porcentaje de días secos y precipitación.

Como podemos observar en la figura 26 existen algunas variaciones entre las precipitaciones observadas y los modelos climáticos 2,6 y 7 que forman picos en alguno de los niveles por lo que se ha decidido eliminarlos. A continuación, se muestran los modelos restantes y a partir de los cuales se escogerá el modelo final.



## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

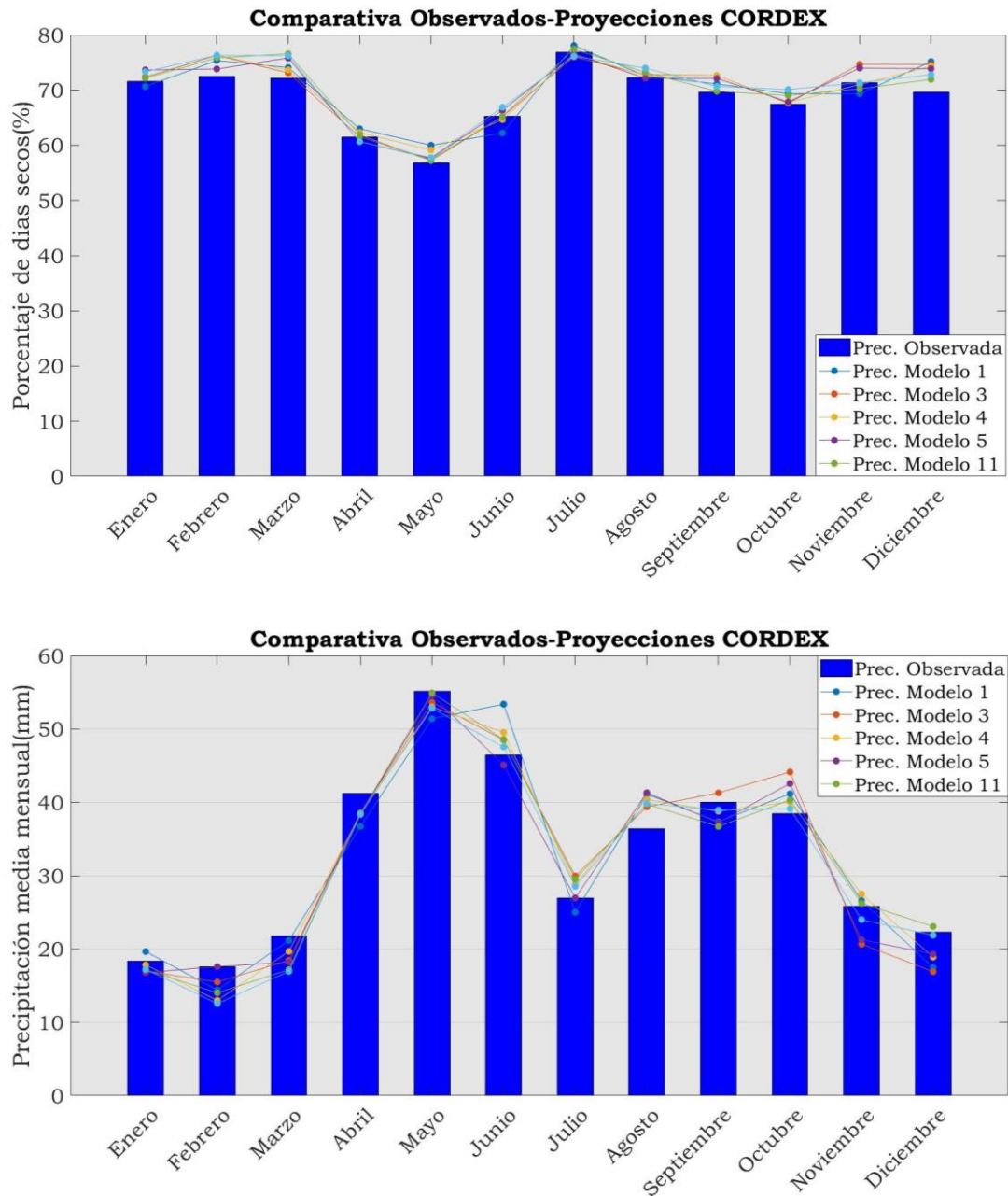
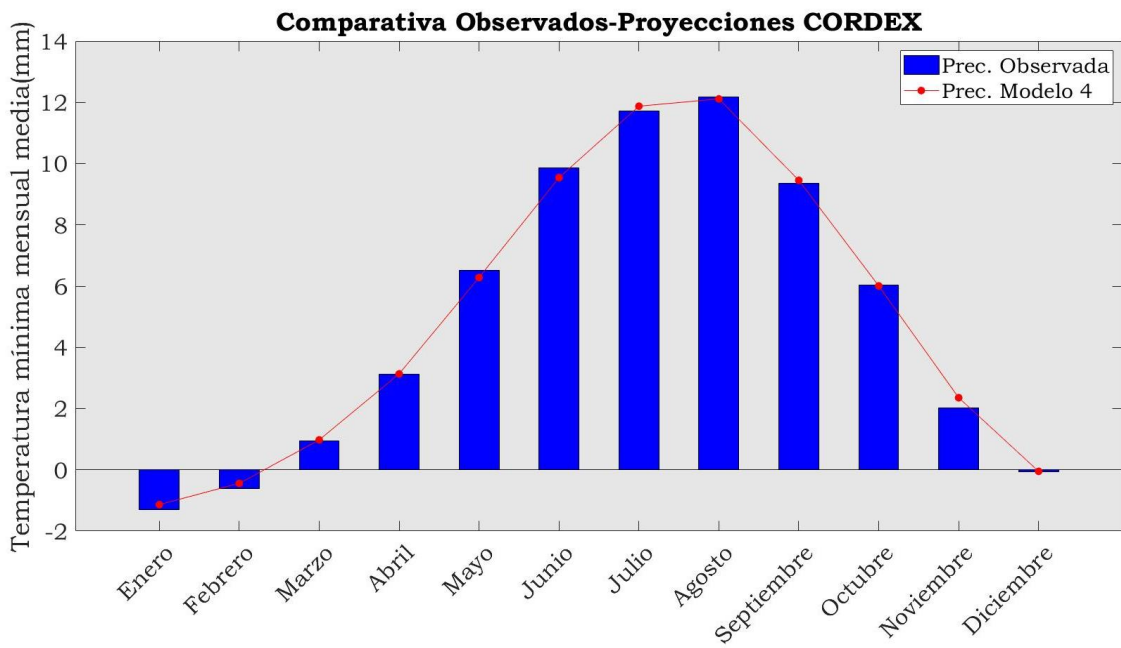
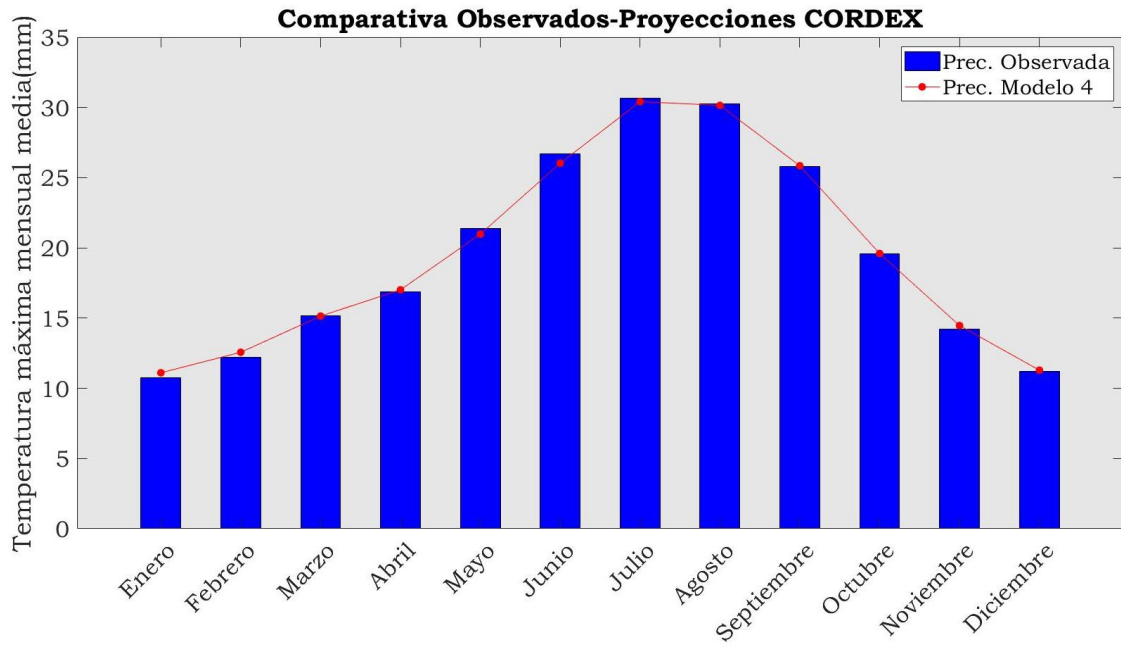


Figura 27: Gráficas de porcentaje de días secos y precipitación de los modelos climáticos 1, 3, 4, 5 y 11.

Finalmente, y tras hacer un último estudio de los modelos restantes, se ha decidido que el modelo que mejor reproduce las precipitaciones observadas, es el modelo climático número 4 del que se presenta a continuación su comparativa en temperatura máxima y mínima, porcentaje de días secos y precipitaciones frente a la observada (Figura 28).

## 5 MODELOS CLIMÁTICOS



## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

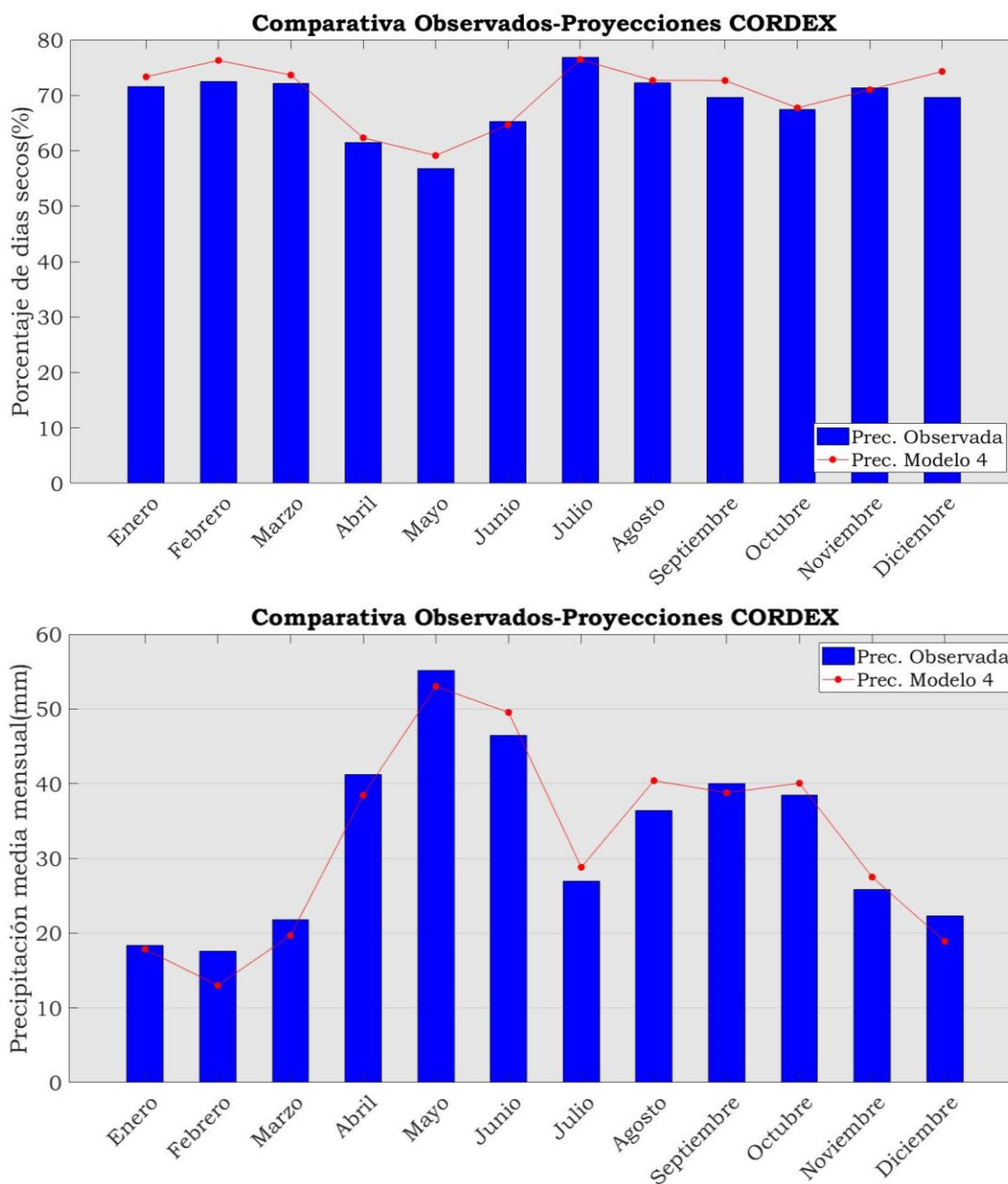


Figura 28: Modelo climático elegido comparativa con observado.

### 5.2 CORRECCIÓN DE SESGO

En el apartado anterior se han utilizado proyecciones de cambio climático del proyecto CORDEX. Como se explicó anteriormente, estas proyecciones proceden de unos modelos climáticos globales (GCM) a los que, a partir de técnicas de regionalización, se han particularizado a las características climáticas de las distintas zonas de la península. Estas técnicas, si bien se acercan lo máximo a la realidad, no tienen por qué resultar completamente fiables y pueden

## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

presentar errores sistemáticos debidos a la discretización, es por ello que se utilizan técnicas de corrección de sesgo para minimizar estos efectos.

En este trabajo se ha utilizado el método de corrección de sesgo denominado *empirical quantile mapping eQM*. Este método se basa en el estudio de la distribución de los valores observados de la variable climática y realiza un ajuste algunas de las características de la función de distribución de probabilidad empírica con los valores proyectados para, posteriormente, aplicar el resultado de este ajuste a las proyecciones, tanto en la de medio plazo (2041-2070) como en el periodo de largo plazo (2071-2100) de forma que las simulaciones queden corregidas.

Esto implica, en nuestro caso de estudio, que se aplica el eQM a la proyección en periodo histórico de la serie de SPAIN02 de precipitaciones de esta forma se obtiene la corrección necesaria. Esta corrección se aplica posteriormente a las proyecciones de clima futuro, medio plazo y largo plazo, para alcanzar las series de cambio climático corregidas. Esta corrección es necesaria dado que no se pueden utilizar directamente las series de proyecciones futuras sin la corrección puesto que los datos no serían adecuados.

Una vez llevada a cabo la corrección de sesgo de la proyección climática 4 elegida en apartados anteriores se puede observar la mejora obtenida (Figura 29).

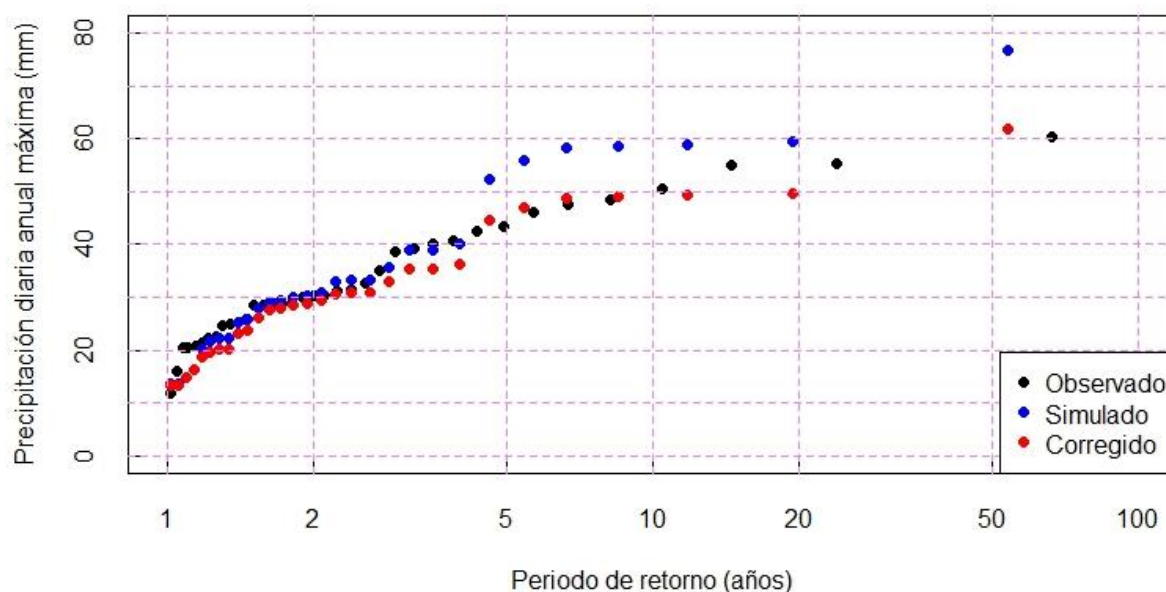


Figura 29: Plotting positions o posiciones gráficas de la precipitación diaria anual máxima observada (negro), proyección en periodo histórico (azul) y proyección en periodo histórico corregida (roja) del modelo climático n<sup>o</sup>4.

## 5 MODELOS CLIMÁTICOS

---

Tras la corrección de sesgo se han podido generar series sintéticas de 1000 años de las proyecciones al igual que se hizo en su momento con los datos de precipitación de clima actual.

En cuanto a la corrección de las temperaturas para poder obtener la evapotranspiración ( $ET_0$ ) de las proyecciones climáticas con periodo 1000 años, se ha llevado a cabo un proceso análogo al anterior.



---

## **6. *RESULTADOS***

---





## 6. RESULTADOS

Como se ha descrito en apartados anteriores, en el presente trabajo se han estudiado paquetes de datos de 100 en 100 años para observar las variaciones que se producían en las medias de cada uno de los paquetes de precipitación. Al observar los resultados, obtenidos al tomar la suposición inicial de necesitar 1000 años, se ha llegado a la conclusión de que las diferencias entre estos paquetes no eran tan relevantes y no habría supuesto un error haber realizado el estudio a partir de 100 años sin embargo a priori no se contaba con esta información por lo que se prefirió garantizar la validez de los resultados al tomar un periodo más extenso.

Como resultados de precipitación se ha podido observar que, en general y según las estadísticas que muestran las series de datos utilizados, las decisiones tomadas a lo largo de este trabajo han sido las acertadas, la calibración del modelo hidrológico, a pesar de no haber sido validada, nos permite alcanzar unos resultados adecuados lo que es prueba en sí misma de la validez de la calibración. Ejemplo de ello es la comparativa en la media y la varianza de los datos de precipitación de clima actual frente a los de cambio climático tanto a medio como a largo plazo (Tablas 9 y 10).

<b>Grupos</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Clima Actual	1.05048714	11.95856804
Cambio Climático Medio Plazo	1.004476272	11.00343414

*Tabla 9: Estadísticas comparativas de precipitación actual frente a escenario de medio plazo en cambio climático.*

<b>Grupos</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Cambio climático Largo Plazo	0.996106601	11.65263804
Clima Actual	1.05048714	11.95856804

*Tabla 10: Estadísticas comparativas de precipitación actual frente a escenario de largo plazo en cambio climático.*

En lo referente al tema objetivo de este estudio, la erosión, los resultados obtenidos también se muestran adecuados y según lo estimado se alcanza una erosión considerable pero acertada conforme a lo estudiado en la zona.

## 6. RESULTADOS

---

<i>Erosión clima actual</i>	92.44	(t/ha*año)
<i>Erosión cambio climático medio</i>	132.78	(t/ha*año)
<i>Erosión cambio climático largo</i>	204.73	(t/ha*año)

Tabla 11: Erosión anual estimada por escenario.

<b>Incremento de la erosión a medio plazo</b>	43.64	%
<b>Incremento de la erosión a largo plazo</b>	121.47	%

Tabla 12: Incremento de la erosión por periodo.

Como se introdujo en la información del capítulo 2 de este documento, se podía predecir, en base al mapa de pendientes de la zona y al primer barrido visual que se hizo de la misma, que las zonas de mayor erosión serían aquellas con las mayores pendientes debido a que tras las precipitaciones el flujo de agua tomaría mayores velocidades en esas zonas. Sin embargo, también se consideró la cantidad de cobertura vegetal que protege de la erosión al suelo.

Tras esta primera suposición, se comprueba que los resultados de pérdida de suelo finales alcanzados son bastante próximos a lo que en un principio se podría suponer.

La zona situada entre las parcelas 1 y 3 es zona que en el pasado fue cantera de arcillas, se encuentra desprovista de toda vegetación y con pendientes de alrededor del 10% con lo que se entiende que la erosión debe mostrarse muy alta. Se comprueba en la figura 30 que la pérdida de suelo en esta zona según los resultados es la máxima.

La zona situada en las proximidades de la parcela 2 es una zona con grandes pendientes, del orden del 15%, y es por ello que en el mapa de resultados aparece también una erosión relevante.

Sin embargo, la zona del norte de la cuenca de estudio tiene una vegetación espesa que protege de la erosión de forma clara, es por ello que los resultados de pérdida de suelo según el mapa son prácticamente nulos.

## 6. RESULTADOS

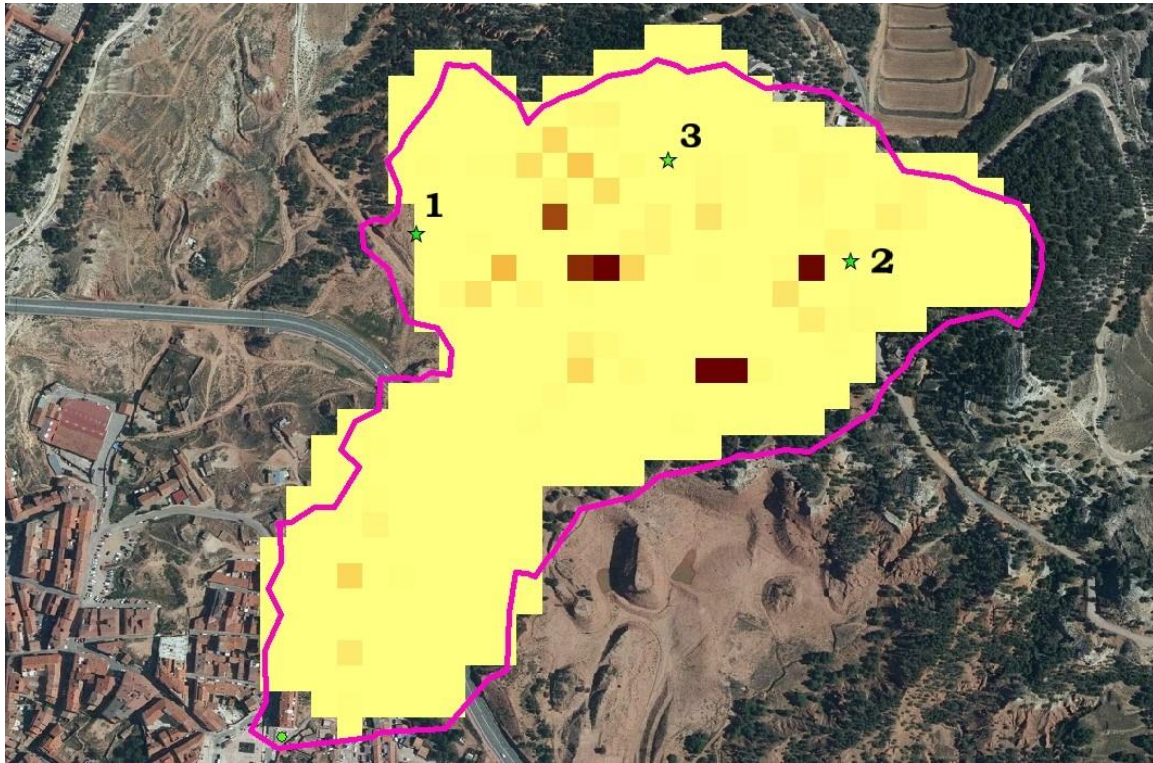


Figura 30: Erosión final en escenario de cambio climático a largo plazo (amarillo=erosión casi nula; marrón=máxima erosión).



---

## ***7. CONCLUSIONES***

---



## 7. CONCLUSIONES

---

Para concluir es necesario comentar que durante la realización de este trabajo han aparecido diferentes problemas, como se puede observar a lo largo del mismo, en relación a la falta de información de caudales en la cuenca de estudio, la obtención de distintos coeficientes, datos de validación de los procesos de calibración utilizados y otra serie de pequeños inconvenientes que se han resuelto de la forma más adecuada posible según el caso.

Al final, y a pesar de los obstáculos, se han alcanzado una serie de resultados que muestran la diferencia a esperar en la erosión de la cuenca de estudio. La pérdida de suelo estimada debida a las condiciones adversas del escenario de cambio climático se muestra considerablemente mayor a la actual llegando a duplicarla a largo plazo. Estos resultados no hacen más que confirmar la ya conocida problemática medio ambiental a la que nos enfrentamos. Sin embargo, el conocimiento de estos datos cada vez más exactos permite una planificación y toma de medidas correctoras que mitiguen en la medida de lo posible los efectos indeseados del cambio climático y permitan organizar los usos del suelo y prevenir el efecto de posibles catástrofes.

Finalmente se recomienda, para unos resultados aún más exactos de la zona, repetir este estudio con una resolución de 5x5m en los mapas de parámetros dado que como se explica a lo largo de este trabajo la resolución elegida no ha resultado la óptima. Además, ante una posible repetición del estudio se recomendaría utilizar series más cortas que faciliten la computación y permitan un estudio a menor escala de los datos de precipitación dado que, como se demostró en este trabajo, al tomar una serie de 1000 años y obtener la media de periodos de 100 años, no habría sido necesario un estudio de un periodo tan extenso.





---

## **8. *REFERENCIAS***

---



## 8. REFERENCIAS

---

- Agencia Estatal de Meteorología, 2019. Temperaturas medias anuales.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Pap.* 56.
- Almorox, J., Antonio, R. de, Saa, A., Diaz, M.C., Gasco, J.M., 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española S.A.
- CEDEX, 2011. Mapa de Caudales Máximos. Memoria Técnica. Madrid (España).
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R., 2012. WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Procedia Environ. Sci.* 13, 2222–2235.
- Einstein, H.A., 1951. The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows H. *Water Resour. Build* 43.
- Einstein, H.A., 1964. Sedimentation, Part II: River sedimentation. In: Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Engelund, F., Eggert, H., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Hydraul Lab.*
- Evin, G., Favre, A.C., Hingray, B., 2018. Stochastic generation of multi-site daily precipitation focusing on extreme events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 655–672.
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *J. Hydrol.* 332, 226–240.
- Fuller, W., 1914. Flood flows. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 77, 564–617.
- García García, M., 2015. Evaluación de la disminución de los procesos erosivos del proyecto de restauración ambiental del paraje “ Las Arcillas ” ( Teruel ).
- Hargreaves, G., Samani, Z., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1, 96–99.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., 2016. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *Int. J. Climatol.* 36, 900–908.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Chang.* 14, 563–578.
- Julien, P., 1995. Erosion and sedimentation.
- Kotlarski, S., Szabó, P., Herrera, S., Rätty, O., Keuler, K., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Bosshard, T., Pagé, C., Boberg, F., Gutiérrez, J.M., Isotta, F.A., Jaczewski, A., Kreienkamp, F., Liniger, M.A., Lussana, C., Pianko-Kluczyńska, K., 2017. Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. *Int. J. Climatol.* 3730–3749.
- MapasIGME - Portal de cartografía del IGME: Mapa Geológico de España a

## 8. REFERENCIAS

---

- escala 1:50.000 (1ª Serie) - Hoja 567 (TERUEL) [WWW Document], n.d. URL <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geo50Hoja.aspx?languag e=es&id=567#mapas> (accessed 6.1.19).
- Mehan, S., Guo, T., Gitau, M.W., Flanagan, D.C., 2017. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. *Climate* 5, 1–40.
- Michael, A., Schmidt, J., Enke, W., Deutschländer, T., Malitz, G., 2005. Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss - Results of comparative model simulations. *Catena* 61, 155–164.
- Papastathopoulos, I., Tawn, J.A., 2013. Extended generalised Pareto models for tail estimation. *J. Stat. Plan. Inference* 143, 131–143.
- Por, E., Age, E., 2004. DISTRIBUCIÓN DEL SUELO POR USOS Y APROVECHAMIENTOS.
- Rojas, R., 2002. GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED. Colorado State University.
- Wilks, D.S., 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *J. Hydrol.* 210, 178–191.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1961. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Trans. ASAE*.

---

**9. ANEJO  
FOTOGRAFICO**

---





## 9. ANEJO FOTOGRÁFICO

---



*Figura 9.1: Interior de la parcela experimental 1.*



*Figura 9.2: Interior de la parcela experimental 1.*



## 9. ANEJO FOTOGRÁFICO

---



*Figura 9.3: Muestra de erosión utilizada en el trabajo actual.*



*Figura 9.4: Muestra anterior tomada de cerca.*



## 9. ANEJO FOTOGRÁFICO

---



*Figura 9.5: Parcela 1.*



*Figura 9.6: Parcela 1.*



## 9. ANEJO FOTOGRÁFICO

---



*Figura 9.7: Parcela 2.*



*Figura 9.8: Parcela 3.*