

# **EVALUACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE BALANCES DE AGUA EN EL SUELO EN LAS PERIDOTITAS DE RONDA**

**Granada, octubre de 2015**

**Autores:**

**José Antonio Cabrera Arrabal  
Sergio Martos Rosillo**



## ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Materiales y métodos	2
2.1. Datos disponibles	2
2.2. Completado de series	3
2.3. Cálculo de la P y T <sup>a</sup> medias de cada zona. Series sintéticas	4
2.4. Cálculo de la ETP	6
2.5. Balance de agua en el suelo	7
2.6. Escorrentía e infiltración	10
3. Resultados.	11
3.1. Sierra de Alpujata	16
3.1.1. Precipitación	16
3.1.2. Temperatura	19
3.1.3. Evapotranspiración potencial	21
3.1.4. Balance agua en el suelo	21
3.2. Sierra Bermeja-Tolox	25
3.1.1. Precipitación	25
3.1.2. Temperatura	28
3.1.3. Evapotranspiración potencial	30
3.1.4. Balance agua en el suelo	30
3.3. Sierra Aguas	34
3.1.1. Precipitación	34
3.1.2. Temperatura	37
3.1.3. Evapotranspiración potencial	39
3.1.4. Balance agua en el suelo	39

3.4. Sierra de la Robla	43
3.1.1. Precipitación	43
3.1.2. Temperatura	46
3.1.3. Evapotranspiración potencial	48
3.1.4. Balance agua en el suelo	48
3.5. Sierra de Mijas	52
3.1.1. Precipitación	52
3.1.2. Temperatura	55
3.1.3. Evapotranspiración potencial	57
3.1.4. Balance agua en el suelo	57
4. Referencias	61

## **1. Introducción.**

Para poder cuantificar los recursos hídricos de una cuenca es necesario conocer, lo más exactamente posible, la cantidad de agua que entra al sistema (precipitación) y las posibles salidas por evaporación y transpiración, y su variabilidad temporal y espacial. Por lo tanto, es de vital importancia contar con una red de estaciones meteorológicas representativas en la zona de estudio, dotadas de sensores fiables.

El número de estaciones debe ser lo suficientemente amplio como para permitir analizar la variabilidad espacial de los datos meteorológicos, y con las series de datos lo más completas posibles. Existen numerosos métodos para estimar los valores inexistentes en las series incompletas de datos de precipitación y temperatura (Creutin y Obled, 1982), como pueden ser las medias totales, la inversa de la distancia al cuadrado y la regresión simple o múltiple.

Para calcular el volumen de agua que alcanza a una cuenca también se pueden aplicar diferentes métodos, como la media aritmética, el método de los polígonos de Thiessen, el de las isoyetas, o métodos geoestadísticos, etc.

La evapotranspiración potencial se puede calcular, de forma aproximada, a partir de datos de temperatura. Una vez conocida la ETP y la capacidad de retención de agua del suelo (CRAS) o reserva útil (RU), que es el agua que el suelo puede almacenar y posteriormente evaporarse o ser transpirada por la vegetación, se determina la evapotranspiración real. La diferencia entre el volumen de lluvia y el volumen de agua evapotranspirada es la lluvia útil (LLU), o lo que es lo mismo; el porcentaje de la precipitación que se transforma en escorrentía, tanto superficial como subterránea, en una cuenca hidrológica.

La LLU se puede descomponer en escorrentía (ESC) e infiltración (INF) conociendo el umbral de escorrentía que a su vez depende del número de curva, que es función de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal.

## 2. Materiales y métodos.

### 2.1. Datos disponibles.

Se parte de las series de datos diarias de precipitación (P) y temperatura (T<sup>a</sup>), de las estaciones que aparecen en la *tabla 1* y *figura 1*.

	Código	Tipo	Altitud	X	Y	Periodo
Genalguacil	6049	P	517	299922	4046728	1971-2012
Ojén	6078	P	332	333909	4048163	1971-2012
Mijas, Sierra Blanca	6085	P	428	353482	4051199	1983-1999
Casarabonela	6135	P-T	480	335743	4072484	1971-2014
Alhaurín el Grande, ICONA	6146	P-T	400	348329	4054987	1971-2014
Yunquera	6138	P	681	328440	4066954	1971-1985
Ronda, Navas de San Luis	6030	P	1100	316374	4059774	1971-1988
Pujerra	6046I	P-T	530	306810	4054280	1977-2014
Benahavis	6069	P	190	316784	4044040	1971-1988
Benahavis, La Zagaleta B	6069B	P-T	380	319031	4046428	1995-2014
Pizarra	6133	P	460	347734	4070412	1971-1989
Carratraca, Hundideros	6134B	P	560	336378	4079717	1983-2014
Tolox	6137E	P	200	329509	4062062	1987-2014
Marbella - Puerto Banus	6076X	P-T	310	325624	4050486	2003-2014
Benahavis, La Zagaleta X	6069X	P-T	399	318886	4046370	2005-2014
Benalmadena	6087	P	240	359248	4051164	1971-2014
Las Mellizas	6126	P	140	346570	4081531	1971-2012
Ojén "Casa Forestal"	6078A	P	280	334714	4048024	2006-2014
Ronda	EARM06	P	618	306090	4070618	1999-2007
Estepona RAIFMA	RAIFMA001	P-T	41	310484	4037670	1996-2014
Casarabonela RAIFMA	RAIFMA003	P-T	560	338536	4068730	1996-2014
Estepona RIA	RIA2904	P-T	199	302049	4035766	2001-2014
Pizarra RIA	RIA2908	P-T	84	347015	4070556	2001-2014
Cártama	RIA2909	P-T	95	350221	4064985	2001-2014

Tabla 1. Estaciones meteorológicas usadas. Donde P = estación pluviométrica y T = estación termométrica.

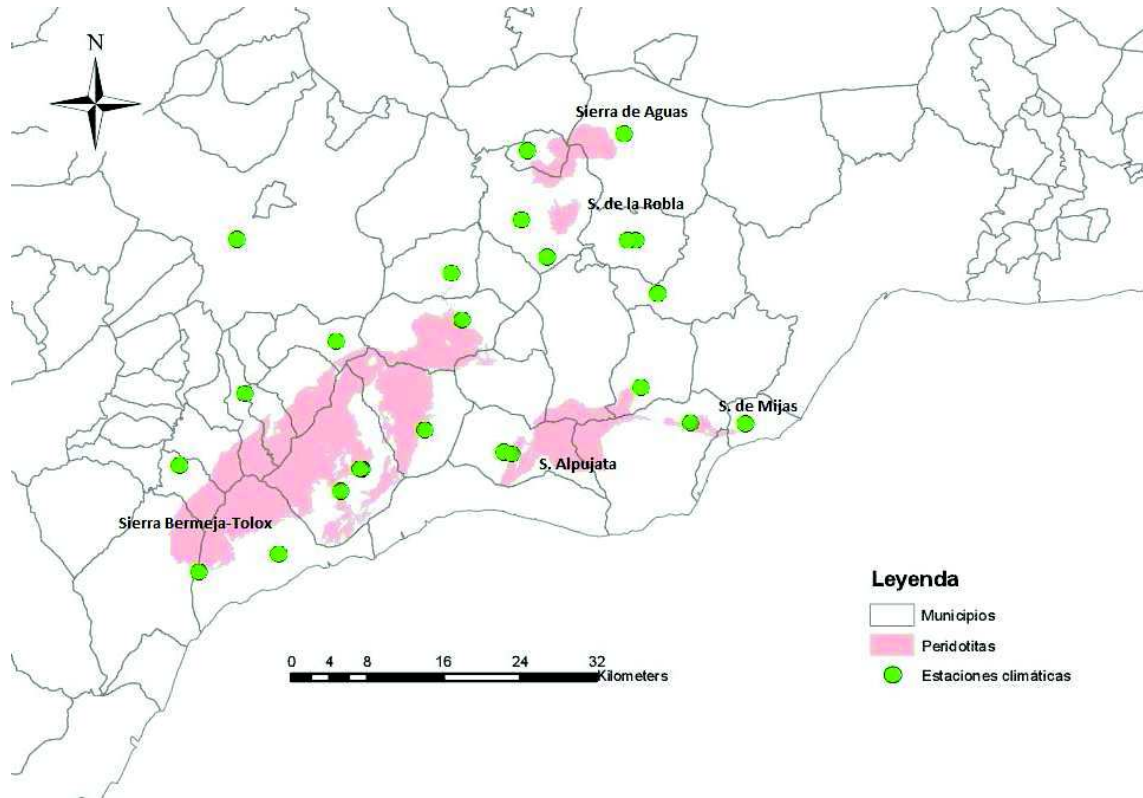


Figura 1. Localización de las peridotitas y de las estaciones climáticas.

Además, para el tratamiento de la información topográfica se ha utilizado el modelo digital de elevaciones con paso de malla de 5 m del IGN, disponible en su página web ([www.ign.es](http://www.ign.es)).

## 2.2. Completado de series.

El completado y el tratamiento de los datos meteorológicos se ha realizado con el programa Trasero 2.0 (Padilla y Delgado, 2014). En el caso del completado de las series meteorológicas se ha optado por el método de *regresión simple*. Partiendo de un conjunto de series, los datos ausentes se completan mediante la ecuación de la recta de regresión de la serie incompleta con la que mayor coeficiente de correlación se obtiene y no le falta ese dato:

$$\hat{Y}_j = bX_j + a$$

Donde:

$a$ ,  $b$ ; coeficientes de la recta de regresión. Se puede optar por un término independiente igual a cero, entonces la recta pasa por el origen de coordenadas.

$X_j$ ; valor existente en la serie con mayor coeficiente de correlación.

Este procedimiento suele ser útil para completar series en las que existe una importante ausencia de datos y se dispone de otras de la misma naturaleza y comportamiento.

### **2.3. Cálculo de la P y T<sup>a</sup> medias de cada zona. Series sintéticas.**

Existen diferentes métodos para establecer la altitud media de una zona, en el presente estudio se ha utilizado un SIG para estimar el promedio del valor de altitud de las celdas del modelo digital de elevaciones, MDE, que integran cada una de las cinco zonas de peridotitas.

Debido a la ausencia de estaciones meteorológicas dentro de cada zona de peridotitas, se ha optado por la creación de una serie sintética representativa para cada una de ellas.

Se requiere obtener la recta de regresión de la precipitación (y temperatura) media anual y la altitud sobre el nivel del mar de cada estación, lo que permite conocer los gradientes altitudinales de precipitación y de temperatura mediante una expresión de la forma:

$$\text{Precipitación} = A \text{ altitud} + B$$

$$\text{Temperatura} = C \text{ altitud} + D$$

Donde

A, B, C y D son los coeficientes de la recta de regresión.

Con el gradiente altitudinal, y la altitud media de cada zona de peridotitas, se calcula la serie diaria de precipitación y temperatura de cada estación meteorológica referidas a la altitud media de la zona de interés. Se trata de una serie virtual a partir de datos reales pero corregidos altitudinalmente para que sean más representativos de la zona que se pretende estudiar.



Este procedimiento para la construcción de las series diarias de P y T<sup>a</sup> virtuales ha requerido de la selección de las estaciones meteorológicas más representativas de cada zona, atendiendo al criterio de proximidad.

Para el cálculo de la precipitación se ha utilizado la expresión:

$$P_{iv} = P_{ir} * \% \text{ altitudinal}$$

Donde:

P<sub>iv</sub> = precipitación virtual de la estación para el día i (mm/día)

P<sub>ir</sub> = precipitación real de la estación para el día i (mm/día)

% altitudinal = incremento o disminución de la precipitación según el gradiente

$$\% \text{ altitudinal} = P_{mr} / P_{mv}$$

$$P_{mv} = P_{mr} * (Z_{zona} - Z_{estación}) * G_p / 100$$

Donde:

P<sub>mr</sub> = precipitación media anual real de la estación (mm/año)

P<sub>mv</sub> = precipitación media anual virtual de la estación (mm/año)

G<sub>p</sub> = gradiente altitudinal de precipitación (mm/100m)

Z<sub>zona</sub> = altitud media de la zona de estudio (m.s.n.m.)

Z<sub>estación</sub> = altitud media de la estación (m.s.n.m.)

Para el cálculo de la temperatura:

$$T_{iv} = T_{ir} + \text{dif altitudinal}$$

Donde:

T<sub>iv</sub> = temperatura virtual de la estación para el día i (°C/día)

T<sub>ir</sub> = temperatura real de la estación para el día i (°C/día)

dif altitudinal = incremento o disminución de la temperatura según el gradiente

$$\text{dif altitudinal} = (Z_{zona} - Z_{estación}) * G_t / 100$$

Donde:

G<sub>t</sub> = gradiente altitudinal de precipitación (°C/100m)

$Z_{\text{zona}}$  = altitud media de la zona (m.s.n.m.)

$Z_{\text{estación}}$  = altitud media de la estación (m.s.n.m.)

Como resultado, la precipitación y temperatura en cada estación meteorológica (series virtuales) se ajusta a la altitud media de la zona donde se desea calcular estos parámetros.

Para cada zona la serie sintética de precipitación ( $P_{sz}$ ) y temperatura ( $T_{sz}$ ) se ha calculado promediando los datos de las estaciones escogidas por proximidad:

$$P_{sz} = \sum P_{vn} / N$$

$$T_{sz} = \sum T_{vn} / N$$

Donde:

$P_{vn}$  = precipitación diaria virtual de la estación n

$T_{vn}$  = temperatura diaria virtual de la estación n

N= número de estaciones escogidas

#### **2.4. Cálculo de la ETP.**

La ETP se ha calculado con la fórmula de de Hargreaves a partir de las series sintéticas de precipitación para cada zona. En este sentido, Allen *et al.* (1998) afirman que, cuando solo se dispone de datos de precipitación y temperatura máxima y mínima diaria, el método de Hargreaves es con el que se obtienen los resultados más parecidos a los obtenidos con la ecuación de Penman (método de referencia adoptado por la FAO). Esta buena correlación está confirmada tanto en Europa (Choisnel *et al.*, 1992), como en Andalucía (Vanderlinden, 2002; Vanderlinden *et al.*, 2004; Gavilán *et al.*, 2005).

Hargreaves y Samani (1985) proponen la siguiente expresión para calcular la evapotranspiración potencial diaria:

$$ETP_i = 0,0135 (t + 17,78) R_s$$

Donde:

$ETP_i$ , evapotranspiración potencial diaria (mm). En el caso de datos mensuales habría que multiplicar por el nº de días del mes.

$t_i$ , temperatura media diaria (°C). Para valores mensuales corresponde a la media mensual.

$R_S$ , radiación solar incidente diaria (mm/d).

La radiación solar incidente se puede obtener mediante la expresión (Samani, 2000):

$$R_S = R_0 KT (t_i^{max} - t_i^{min})^{0.5}$$

Donde:

$R_0$ , radiación solar extraterrestre diaria. Es la que se recibe sobre una superficie situada en el límite superior de la atmósfera (MJulios/m<sup>2</sup>/día).

KT, coeficiente empírico que depende de la presión atmosférica. Hargreaves recomienda KT = 0,162 para regiones del interior y KT = 0,19 para regiones costeras.

$t_i^{max}$  y  $t_i^{min}$ , temperatura diaria máxima y diaria mínima (°C).

La radiación solar extraterrestre se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$R_0 = 37,59 d_{t-s} (0,01745 w \text{ sen}(\varphi) \text{ sen}(d) \text{ cos}(\varphi) \text{ cos}(d) \text{ sen}(w))$$

Donde:

$d_{t-s}$ , distancia relativa entre el Sol y la Tierra:  $d_{t-s} = 1 + 0,033 \text{ cos} \left( 2\pi \frac{n}{365} \right)$ .

$n$ , día del año contado desde el 1 de enero. En el caso de datos mensuales se calcula para el día 15 del mes correspondiente.

$w$ ,  $d$ , ángulo horario y declinación solar en grados.

$\varphi$ , latitud en grados.

## 2.5. Balance de agua en el suelo.

Los modelos más sencillos de balance de agua en el suelo consideran el suelo como un depósito con una capacidad de almacenamiento limitada, en el que las entradas se

producen por la lluvia y las salidas por evapotranspiración, de forma que cuando el recipiente desborda se produce escorrentía (Martos-Rosillo, 2008). Las diferencias entre estos modelos obedecen a la distinta evaluación de la evapotranspiración (Alley, 1984; Milly, 1994a, b), no obstante, también debe ser considerado escalas de tiempo adecuadas a la variabilidad meteorológica de la zona donde se hace el balance. En relación con lo anterior, Samper (1998) señala que en condiciones áridas y semiáridas es de especial importancia hacer una correcta elección de la escala de tiempo empleada al realizar los balances de agua: los mecanismos de recarga no son lineales, por tanto el cálculo de la recarga en periodos grandes de tiempo debe obtenerse integrando los valores de recarga de cada uno de los sucesos en los que se produce. La elección de un intervalo de tiempo mensual puede conducir a calcular una recarga nula, cuando en realidad han podido existir diversos periodos cortos especialmente lluviosos, en los que la aportación de lluvia puede sobrepasar el déficit de humedad de agua en el suelo y provocar recarga (Martos-Rosillo, 2008).

Además, cuando se realiza un balance de agua en el suelo, uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta es el de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS) o de la reserva útil (RU), que se define como el intervalo de humedad volumétrica integrado entre el punto de marchitez permanente,  $\theta_{PM}$ , y la capacidad de campo,  $\theta_{cc}$  (Allen *et al.*, 1998). Es la cantidad de agua que permanece en el suelo a disposición de las plantas. El punto de marchitez permanente es el contenido volumétrico de agua con el que puede tener lugar la transpiración de una planta determinada; con cantidades menores de agua se marchita permanentemente. Depende del tipo de suelo y del tipo de planta. La capacidad de campo representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, es decir, la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente. Es un concepto poco preciso, pues depende del tiempo de drenaje. Este hecho ha provocado que sea más usual definir la capacidad de campo como el contenido volumétrico de agua a una succión determinada (Carrera y Saaltink, 2002). Sin embargo, tampoco existe un acuerdo en el potencial a elegir (Martos-Rosillo, 2008).

Es conveniente explicar que, como los contenidos de humedad superiores a la capacidad de campo no se pueden retener en el suelo, en contra de las fuerzas de gravedad, y son drenados, y como los contenidos de humedad por debajo del punto de marchitez

permanente no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad correspondientes a la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente (Allen *et al.*, 1998).

Por otro lado, es frecuente que la capacidad de retención de agua en el suelo, el punto de marchitez permanente,  $\theta_{PM}$ , y la capacidad de campo,  $\theta_{CC}$ , se expresen referidas a la altura de la zona radicular del suelo. En ese caso la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS) suele expresarse como la altura (en mm) de la columna de agua que es capaz de retener una columna de suelo de una altura igual a la profundidad de penetración de las raíces. De todo ello resulta que:

$$CRAS = 1000 \times (\theta_{CC} - \theta_{PM}) \times Z_r \text{ (mm)}$$

Donde:

$CRAS$  = capacidad de retención agua en el suelo (mm).

$\theta_{PM}$  = contenido de humedad a punto de marchitez permanente ( $m^3 m^{-3}$ ).

$\theta_{CC}$  = contenido de humedad a capacidad de campo ( $m^3 m^{-3}$ ).

$Z_r$  = profundidad de las raíces (m).

En este estudio, se ha realizado el balance de agua en cada zona de peridotitas con el modelo propuesto por Thornthwaite (1948), utilizando una gama amplia de diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo: 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 y 300 mm, y las series sintéticas de P y ETP de cada zona. De esta forma, se han determinado diferentes valores de evapotranspiración real y de lluvia útil.

Thornthwaite, en su modelo propuesto en 1948, plantea para cada periodo de tiempo  $i$  un balance del suelo según la siguiente expresión:

$$P_i = ETR_i + LLU_i + \Delta R_i$$

Donde:

$P_i$ , lluvia

$\Delta R_i$ , incremento de la reserva de agua en el suelo utilizable por las plantas (mm).

Dicho balance se realiza según las siguientes premisas:

- $ETR_i \leq ETP_i$ .
- El suelo no puede almacenar más que la capacidad de campo (CC) y depende fundamentalmente de la litología del suelo.
- Siempre que se disponga de agua, precipitación más la almacenada en el suelo, es prioritario primero cubrir la necesidades de  $ETR_i$ , hasta su límite ( $ETP_i$ ) y después aumentar el agua almacenada en el suelo, hasta su límite (CC).
- El excedente de agua, una vez cubiertas las demandas de  $ETP_i$  y CC, integra la  $LLU_i$ .

## **2.6. Escorrentía e infiltración.**

Para descomponer la  $LLU_i$  en escorrentía ( $ESC_i$ ) y en infiltración ( $INF_i$ ) se ha seguido el método del Soil Conservation Service de los EE.UU (Témez, 1978). Este método parte de un umbral de escorrentía ( $P_o$ ) a partir del cual se empieza a producir escorrentía superficial. El valor de este parámetro depende de la litología, de la pendiente y de la vegetación (ver cuadro adjunto). La escorrentía se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ESC_i = \frac{(LLU_i - P_o)^2}{LLU_i + 4 P_o}$$

La infiltración, para un determinado mes es igual:

$$INF_i = LLU_i - ESC_i$$

El valor de  $P_o$  tiene su equivalencia con el denominado número de curva (NC) mediante la siguiente expresión:

$$P_o = \frac{5080}{NC} - 50,8$$

Donde NC es el número de curva, y se encuentra tabulado (Temez, 1978).

Hay que indicar que este método hay que aplicarlo con ciertas reservas pues está ideado para obtener la escorrentía superficial en cuencas pequeñas y para intervalos de tormenta relativamente cortos. Para obtener los resultados medios que normalmente se esperan en estudios más extensos, tanto en superficie como en el tiempo, hay que emplear esta utilidad con criterios hidrológicos y analizar los resultados para que sea coherente con el funcionamiento esperado.

### 3. Resultados.

Tras el completado de las series de precipitación y temperatura de las estaciones que figuran en el *apartado 3.1*, con la ayuda de la aplicación *Trasero 2.0*, se ha procedido al análisis de los datos. La precipitación media de cada estación aparece en la *tabla 3*, y la temperatura media en la *tabla 4*. Las estaciones usadas para los cálculos en cada zona de peridotitas son las que aparecen en la siguiente tabla:

	S. Alpujata	S. Bermeja-Tolox	S. Aguas	S. Robla	S. Mijas
Genalguacil		X			
Ojén	X				
Mijas, Sierra Blanca					X
Casarabonela				X	
Alhaurín el Grande	X				X
Ronda, Navas de San Luis		X			
Pujerra		X			
Benahavis		X			
Benahavis, La Zagaleta B		X			
Carratraca, Hundideros			X		
Tolox		X			
Marbella - Puerto Banus					
Benahavis, La Zagaleta X		X			
Benalmadena					X
Las Mellizas			X		
Ojén "Casa Forestal"	X				
Estepona RAIFMA		X			
Casarabonela RAIFMA				X	
Estepona RIA		X			

<b>Pizarra RIA</b>			X	X
<b>Grid 01134</b>	X			
<b>Grid 00914</b>		X		
<b>Grid 00988</b>		X		
<b>Grid 01209</b>			X	
<b>Grid 01135</b>				X
<b>Grid 01206</b>				X

**Tabla 2.** Estaciones meteorológicas usadas en cada zona de peridotitas.

	<b>Altitud</b>	<b>Precipitación</b>
<b>Genalguacil</b>	517	916
<b>Ojén</b>	332	956
<b>Mijas, Sierra Blanca</b>	428	817
<b>Casarabonela</b>	480	716
<b>Alhaurín el Grande</b>	400	650
<b>Yunquera</b>	681	647
<b>Ronda, Navas de San Luis</b>	1100	1066
<b>Pujerra</b>	530	1038
<b>Benahavis</b>	190	970
<b>Benahavis, La Zagaleta B</b>	380	891
<b>Pizarra</b>	460	520
<b>Carratraca, Hundideros</b>	560	634
<b>Tolox</b>	200	875
<b>Marbella - Puerto Banus</b>	310	579
<b>Benahavis, La Zagaleta X</b>	399	808
<b>Benalmadena</b>	240	701
<b>Las Mellizas</b>	140	540
<b>Ojén "Casa Forestal"</b>	280	1117
<b>Ronda</b>	618	508
<b>Estepona RAIFMA</b>	41	821
<b>Casarabonela RAIFMA</b>	560	575
<b>Estepona RIA</b>	199	884
<b>Pizarra RIA</b>	84	497
<b>Cártama</b>	95	512
<b>Media</b>	384	753
<b>Desviación estandar</b>	235	196



<b>Coef. Variación</b>	0.6	0.3
<b>Mediana</b>	390	716
<b>Min</b>	41	497
<b>Max</b>	1100	1117
<b>Coef. Asimetría</b>	1.1	0.3

Tabla 3. Pluviometría media de las estaciones analizadas.

	<b>Altitud</b>	<b>Tmin</b>	<b>Tmáx</b>	<b>Tmed</b>
<b>Casarabonela</b>	480	11.3	19.8	15.55
<b>Alhaurín el Grande</b>	400	12.44	23	17.72
<b>Pujerra</b>	530	11.46	19.07	15.27
<b>Benahavis, La Zagaleta B</b>	380	12.88	21.97	17.43
<b>Marbella - Puerto Banus</b>	310	14.88	20.78	17.83
<b>Benahavis, La Zagaleta X</b>	399	12.55	21.49	17.02
<b>Estepona RAIFMA</b>	41	13.35	23.11	18.23
<b>Casarabonela RAIFMA</b>	560	13.64	22.81	18.22
<b>Estepona RIA</b>	199	14.19	22.27	18.23
<b>Pizarra RIA</b>	84	12.31	24.31	18.31
<b>Cártama</b>	95	12	24.31	18.16
<b>Media</b>	384	13	22	16
<b>Desviación estandar</b>	235	1	2	5
<b>Coef. Variación</b>	0.6	0.1	0.1	0.3
<b>Mediana</b>	390	13	22	18
<b>Min</b>	41	11	19	0
<b>Max</b>	1100	15	24	18
<b>Coef. Asimetría</b>	1.1	0.5	-0.4	-3.2

Tabla 4. Temperatura anual de las estaciones analizadas. Donde Tmáx = temperatura máxima, Tmin = temperatura mínima y Tmed = temperatura media.

Dado la amplitud de la zona de estudio, y la variación observada de la precipitación con la latitud y la longitud de las estaciones climáticas, y de su exposición a los frentes lluviosos del oeste predominantes en la zona, no resulta un gradiente claramente definido en el estudio de la correlación de todas las estaciones (*figura 2*):

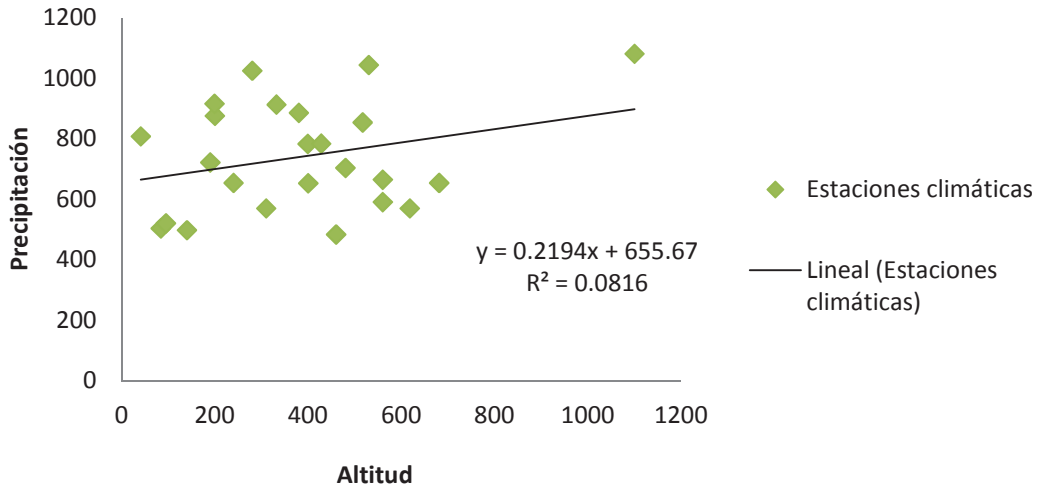


Figura 2. Relación pluviometría-altitud para todas las estaciones de la zona de estudio.

Seleccionando ciertas estaciones más o menos cercanas entre sí, se obtiene un coeficiente de correlación mayor (figura 3):

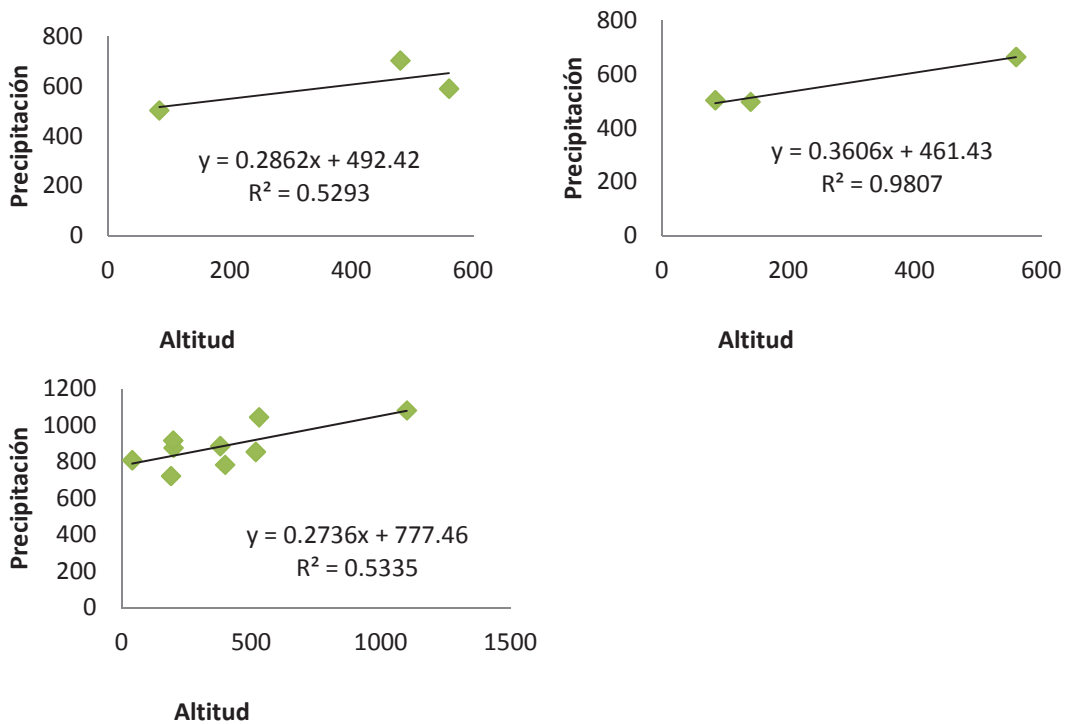


Figura 3. Relación pluviometría-altitud para estaciones cercanas entre sí dentro de la zona de estudio.

Otros autores (Pardo *et al.*, 2012), (Liñán, 2005), (Andreo, 1997) han calculado un gradiente altitudinal para la precipitación entorno a los 60 mm/100m.

En este estudio se ha optado por trabajar con un gradiente para la precipitación de 30 mm/100m, ya que es el valor más común obtenido en este trabajo.

Para el caso de la precipitación el cálculo del gradiente altitudinal de la temperatura es el siguiente (figura 4):

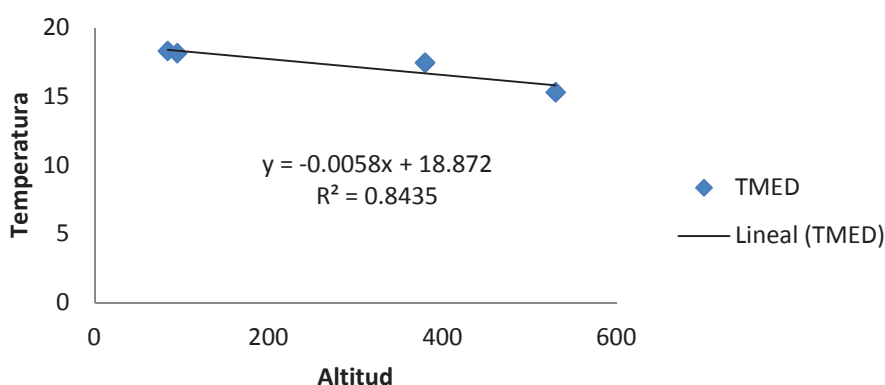


Figura 4. Relación temperatura media – altitud.

La correlación obtenida en el caso de la variación de la temperatura con la altitud es muy elevada ( $R^2 = 0.84$ ) pero no existen muchas estaciones termométricas en las cotas más elevadas, y es obvio que las estaciones más cercanas al mar se encuentran muy influenciadas por este. Pardo *et al.*, (2012), Liñán (2005) y Andreo (1997) han obtenido un gradiente en la zona de 0,75-0,8 °C/100m.

En este trabajo se ha optado por trabajar con un gradiente altitudinal para la temperatura de 0,7 °C/100m que es el valor más común, y medio entre el obtenido con las estaciones de este trabajo y el obtenido por los otros autores que han trabajado en la zona.

### 3.1. Sierra Alpujata.

Las peridotitas de Sierra Alpujata abarcan una superficie de 63,44 km<sup>2</sup> y tienen una altitud media de 428 m.s.n.m. En la *tabla 5* se exponen las características de las peridotitas de S. Alpujata:

	Area (km <sup>2</sup> )	Altitud med (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Arbolado (%)	Matorral (%)	Pastizal (%)	Cultivo (%)
<b>S. Alpujata</b>	63.44	428	48	3	51	41	5

Tabla 5. Características de la zona de peridotitas de S. Alpujata.

#### 3.1.1. Precipitación.

Se ha calculado la precipitación media en S. Alpujata cómo se ha descrito en la metodología, resultando los valores de la siguiente tabla:

	P. año seco (mm)	P. año medio (mm)	P. año húmedo (mm)
<b>S. Alpujata</b>	424	835	1989

Tabla 6. Años tipo de precipitación en las peridotitas de S. de Alpujata.

En el periodo 1980-2014, la precipitación media en la zona es de 835 mm/año, con un valor de 424 mm/año, en el año de tipo seco, y, 1989 mm/año, en el año de tipo húmedo.

En la *figura 5* se representa la precipitación media mensual de un año de tipo medio. Los meses más lluviosos son los de Noviembre (147 mm), Diciembre (149 mm) y Enero (108 mm) mientras los más secos se corresponden con Julio (0,6 mm) y Agosto (7 mm), durante los que apenas se registra precipitación.

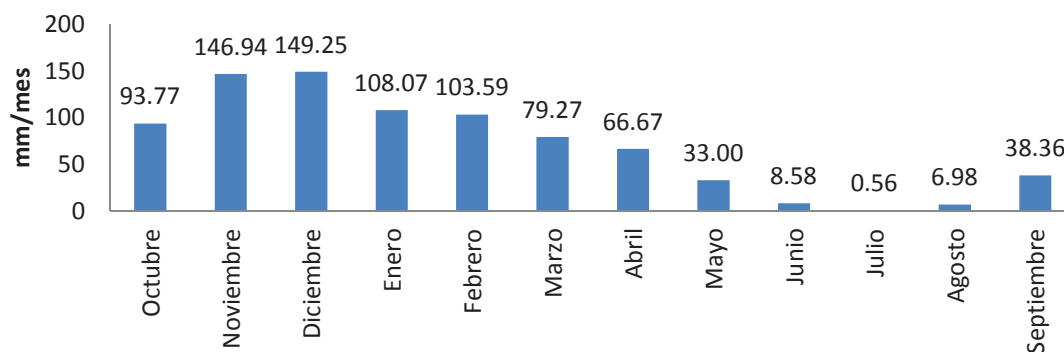


Figura 5. Precipitación media mensual para el año tipo medio de la S. Alpujata.

En las figuras siguientes (*figuras 6 y 7*) se puede observar la distribución temporal de la precipitación lo largo del periodo de estudio (1980-2014). Se observa una tendencia de aumento en la cantidad de precipitación durante el periodo de estudio.

En la serie de 35 años de datos diarios, resultan las siguientes intensidades medias diarias de precipitación en la S. de Alpujata (*tabla 7*):

1980-2014	Total	P>5	P>10	P>20	P>50	P>100	P>200
<b>Días al Año</b>	63.14	35.66	24.31	13.31	3.06	0.37	0.00
<b>Probabilidad</b>	0.1729	0.0976	0.0666	0.0365	0.0084	0.0010	0.0000
<b>Periodo retorno días</b>	5.8	10.2	15.0	27.4	119.5	983.4	0.0
<b>Periodo retorno años</b>	0.02	0.03	0.04	0.08	0.33	2.69	0.00
<b>Promedio</b>	2.29						
<b>Desv. Estandar</b>	8.95						
<b>Promedio días lluvia</b>	13.22						

Tabla 7. Intensidad diaria de la precipitación en S. Alpujata.

Un rasgo importante que se deduce del análisis realizado consiste en el que el total pluviométrico anual se produce en un número reducido de días al año (63 días). De estos 63 días, tan solo en 24 días al año, la intensidad de la lluvia es mayor a 10 mm/día y solo en 13 días al año es superior a 20 mm/día. Intensidades superiores a los 50 mm/día sólo ocurren 3 días al año. Episodios con intensidades superiores a 100 mm/día ocurren con un periodo de retorno de 2,69 años, mientras que los superiores a 200 mm/día no se han producido en el periodo 1980-2014.

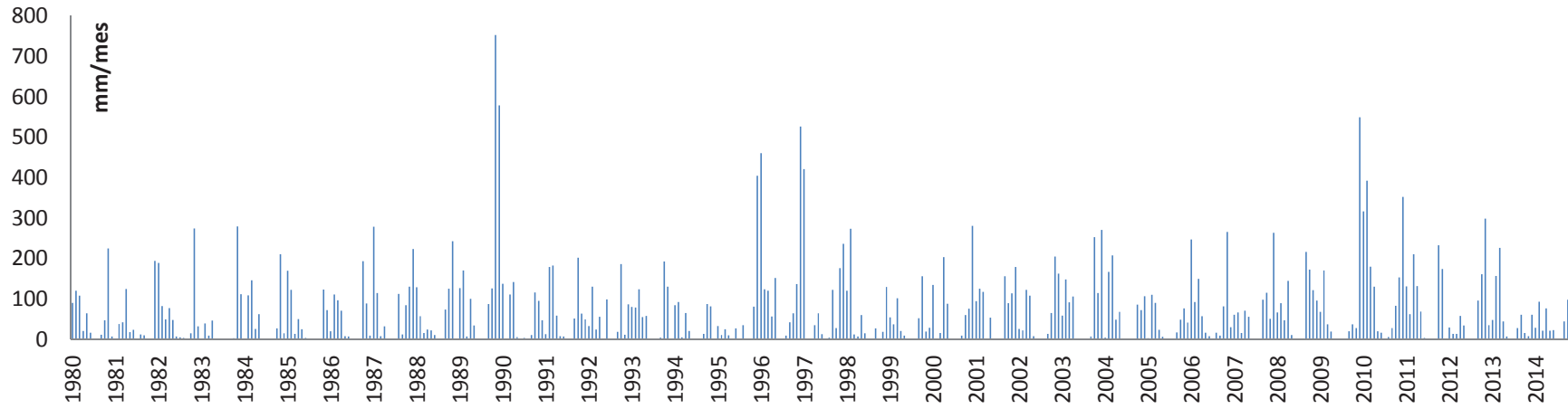


Figura 6. Precipitación mensual para el periodo de estudio de S. Alpujata.

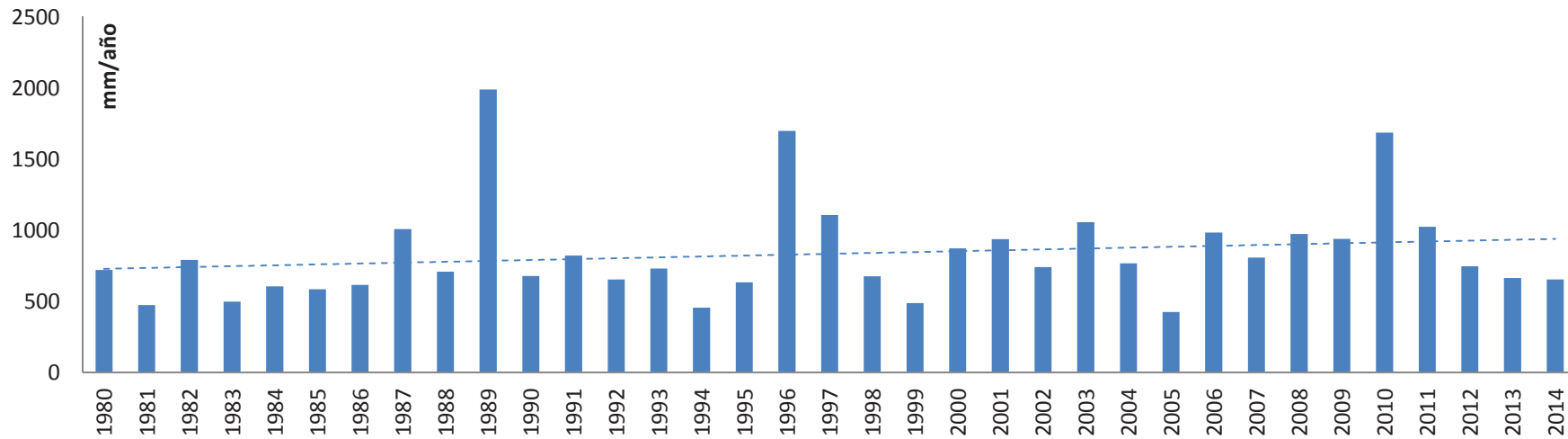


Figura 7. Precipitación anual para el periodo de estudio de S. Alpujata.

### 3.1.2. Temperatura.

Se ha calculado la temperatura media en S. Alpujata, obteniéndose los valores medios de los años tipo de la *tabla 8*.

	TMED año frío (°C)	TMED año medio (°C)	TMED año cálido (°C)
S. Alpujata	15,52	18,23	24,71

Tabla 8. Años tipo de temperatura media en las peridotitas de S. Alpujata.

De este modo, en el periodo 1980-2014, la temperatura media en S. Alpujata es de 18,23 °C en el año tipo medio, con los valores de 15,52 °C correspondientes al año de tipo frío y 24,71 °C en el de tipo cálido.

En la *figura 8* se representa la temperatura media mensual del año de tipo medio. El mes más frío es Enero (11,82 °C) mientras que el más cálido es Agosto (25,69 °C), con una amplitud térmica anual de 9,59 °C.

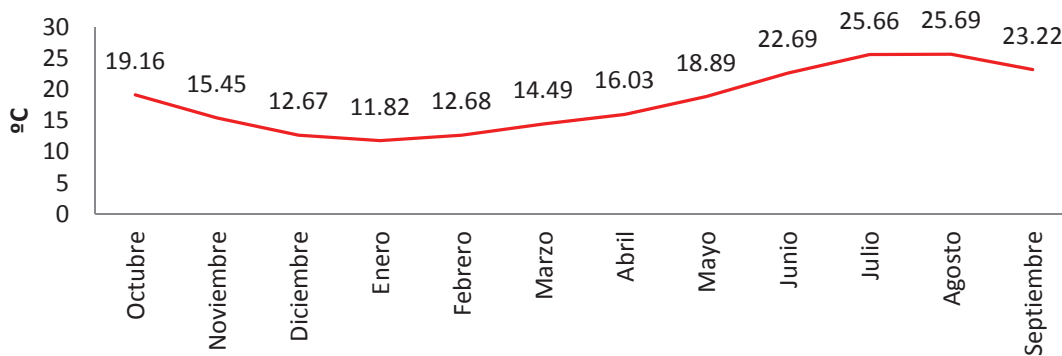


Figura 8. Temperatura media mensual para el año tipo medio en las peridotitas de S. Alpujata.

En la figura siguiente (*figura 9*) se puede observar la distribución temporal de la temperatura media mensual a lo largo del periodo de estudio (1980-2014).

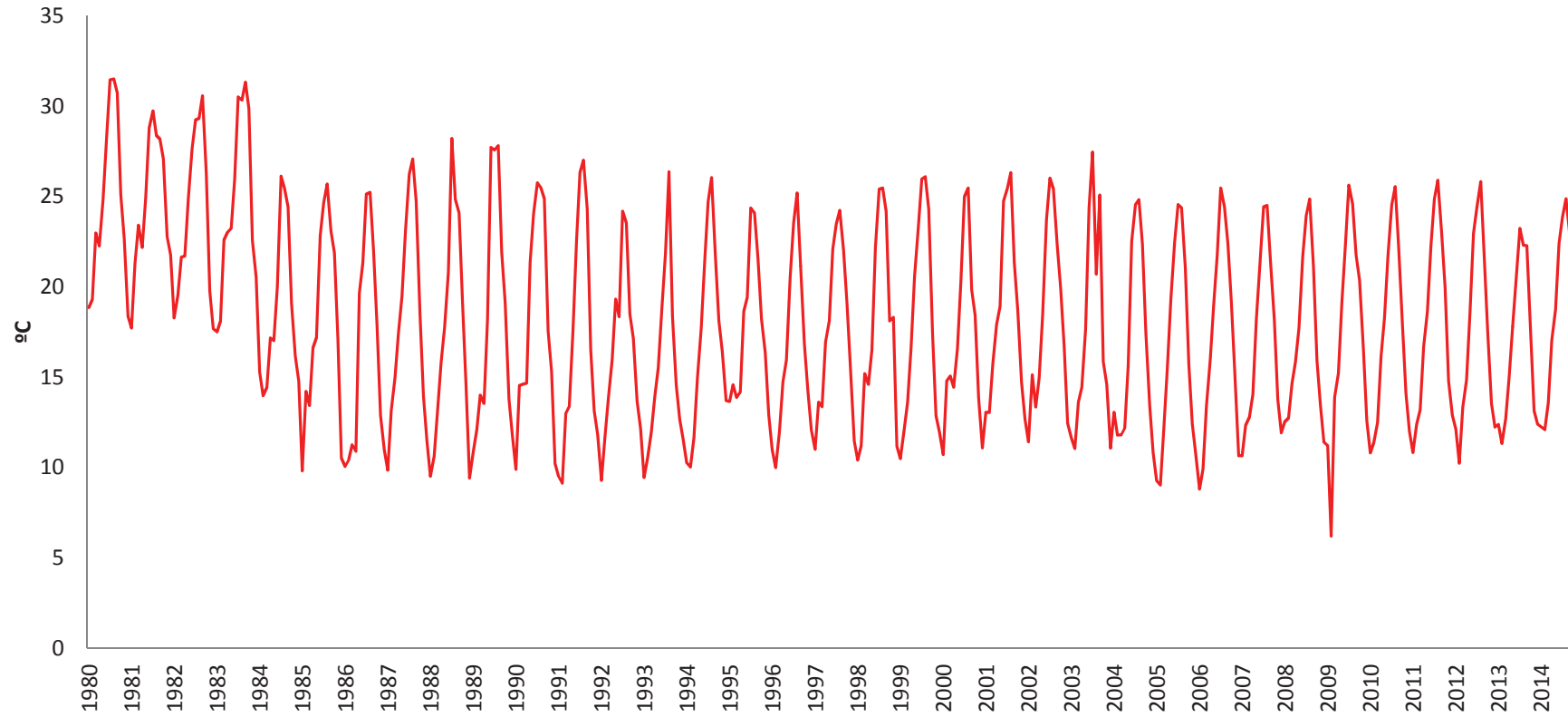


Figura 9. Temperatura mensual para el periodo de estudio en las peridotitas de S. Alpujata.



### 3.1.3. Evapotranspiración potencial.

Los valores medios de los años tipo de la ETP en S. Alpujata, que se recogen en la siguiente tabla:

	ETP año frio (mm)	ETP año medio (mm)	ETP año cálido (mm)
S. Alpujata	1064	1382	2051

Tabla 9. Años tipo de ETP (Hargreaves) en S. Alpujata.

La ETP media en la zona es de 1382 mm/año, con valores extremos de 1064 mm/año y 2051 mm/año.

El mes con menor ETP es Diciembre (46 mm) mientras que el mes con la ETP más elevada es Julio (196 mm) (figura 10).

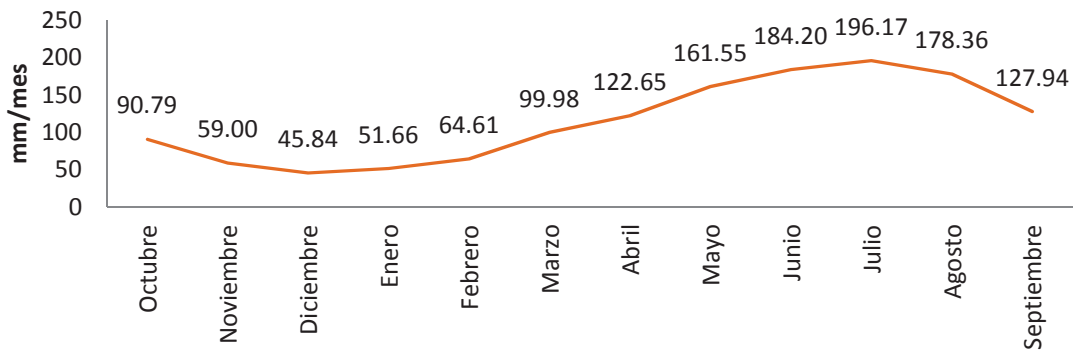


Figura 10. ETP (Hargreaves) media mensual para el año tipo medio de S. Alpujata.

### 3.1.4. Balance agua en el suelo.

Los balances de agua en el suelo se han realizado aplicando el modelo de Thornthwaite a los datos contenidos en las series de precipitación y ETP diarias, esta última calculada con la expresión de Hargreaves. Se han utilizado capacidades de retención de agua en el suelo de 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 mm. Para el cálculo de la infiltración se ha

usado el método del número de curva, para dos valores del umbral de escorrentía: grupos de suelo B (capacidad de infiltración moderada) y C (infiltración lenta).

En la *figuras 11, 12 y 13* se representan los valores de lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y escorrentía (ESC) en función de los diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS), para un valor de umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 25,24:

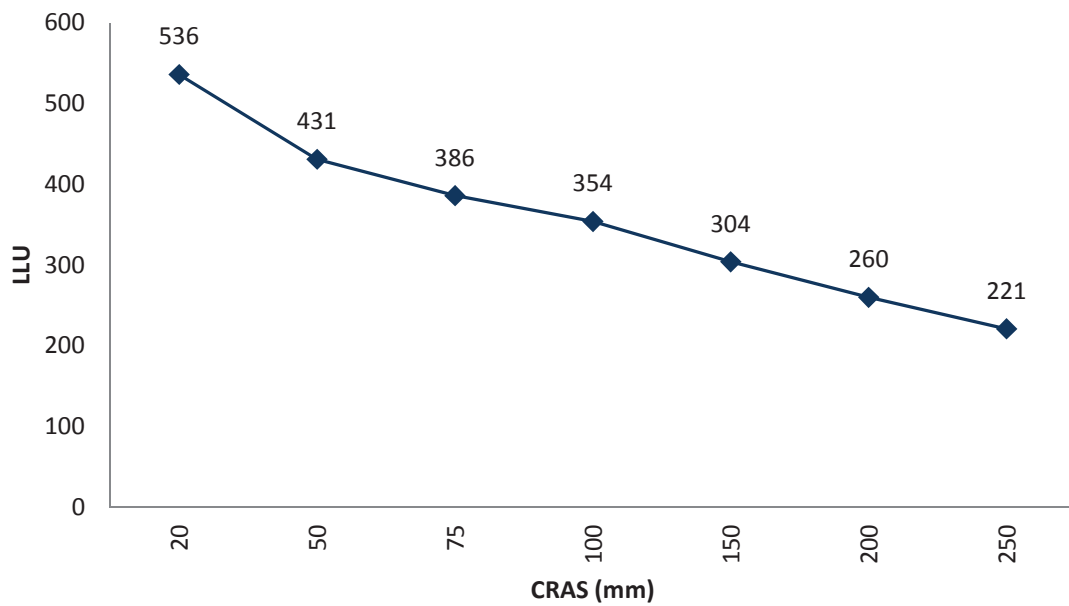


Figura 11. Lluvia útil en función de la CRAS para S. Alpujata.

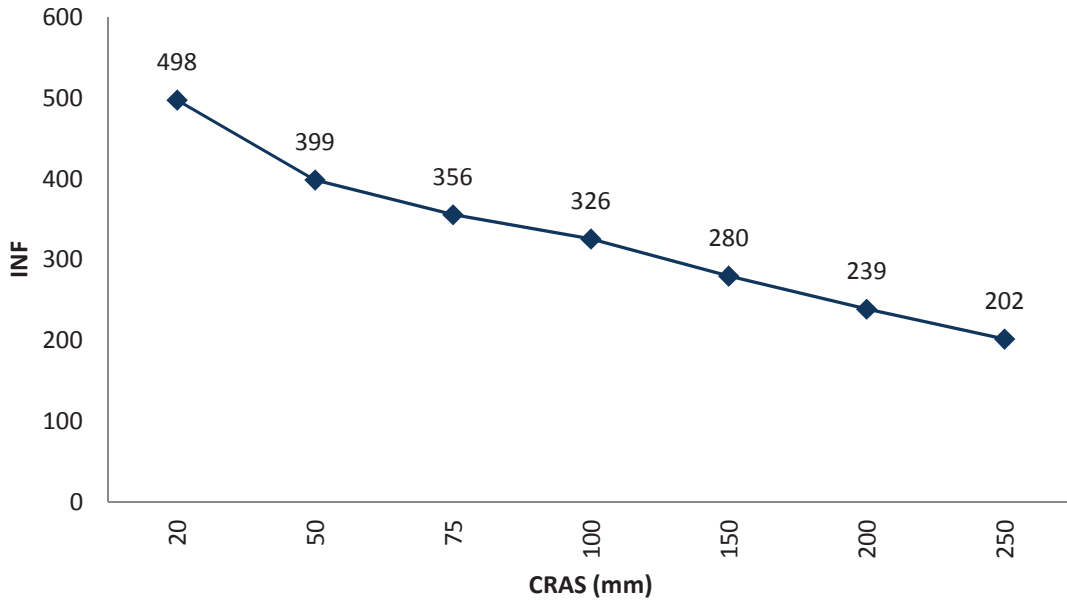


Figura 12. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 25,24 en S. Alpujata.

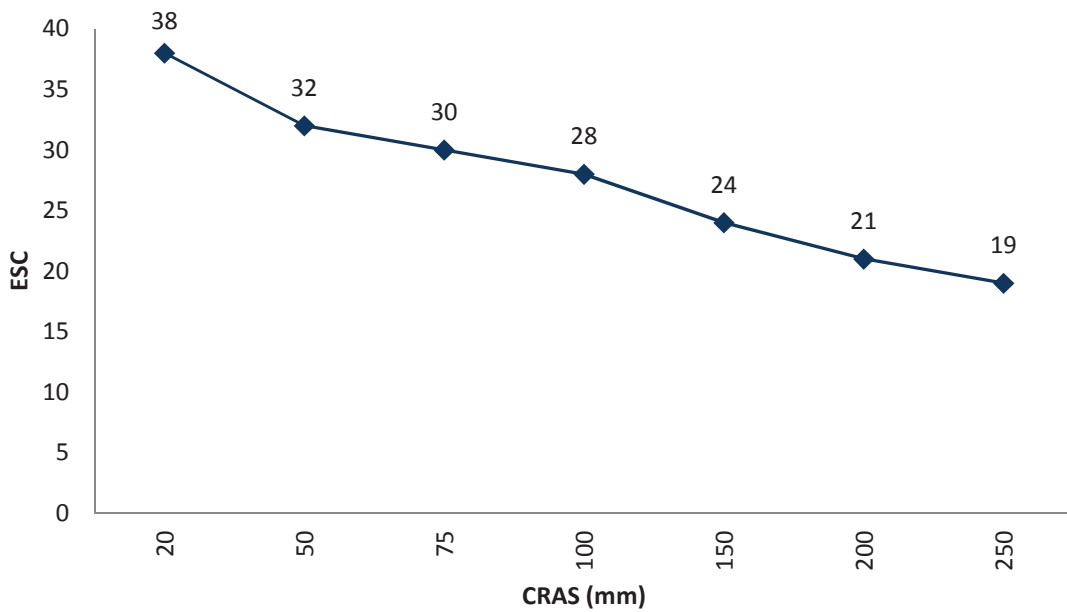


Figura 13. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 25,24 en S. Alpujata.

En la *figuras 14*, y *15* se representan los valores de INF y ESC en función de la CRAS, para un valor de umbral de escorrentía de 15,88:

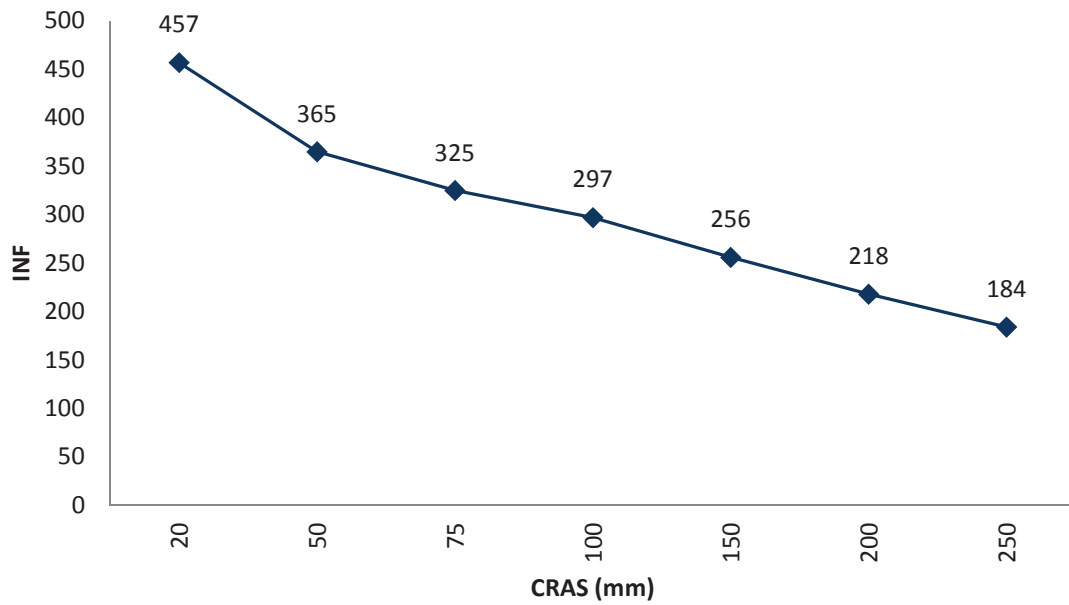


Figura 14. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 15,88 en S. Alpujata.

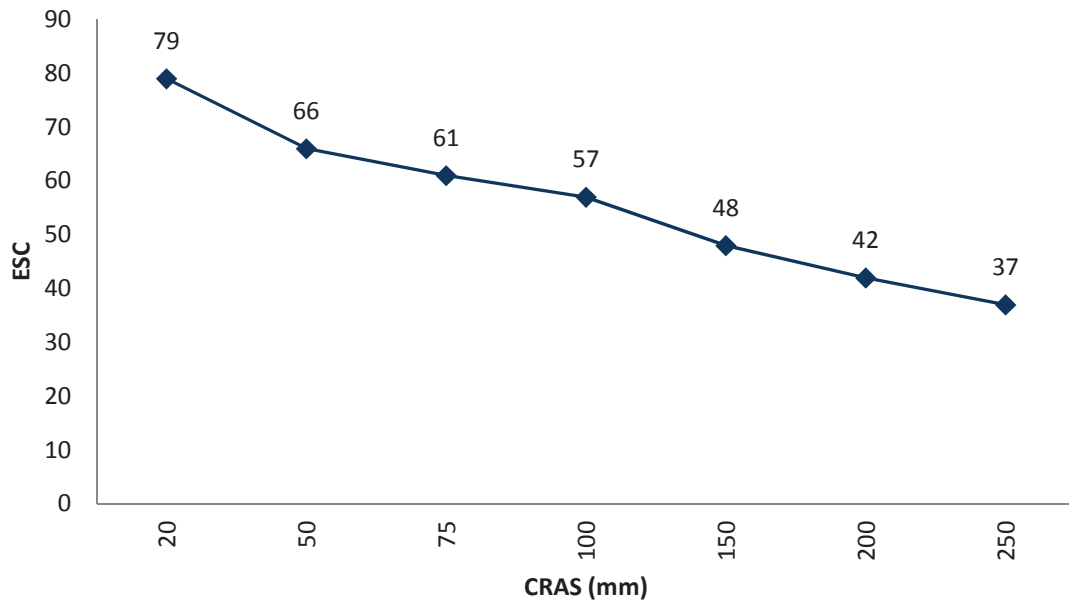


Figura 15. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 15,88 en S. Alpujata.

Se observa como es lógico que los valores de lluvia útil, infiltración y escorrentía descenden al aumentar el valor de la CRAS, y que un mayor umbral de escorrentía supone una mayor infiltración y una menor escorrentía.

### 3.2. Sierra Bermeja-Tolox.

Las peridotitas de Sierra Bermeja-Tolox abarcan una superficie de 311,3 km<sup>2</sup> y tiene una altitud media de 662 m.s.n.m. En la *tabla 10* se exponen las características de las peridotitas de S. Bermeja-Tolox:

	Area (km <sup>2</sup> )	Altitud med (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Arbolado (%)	Matorral (%)	Pastizal (%)	Cultivo (%)
S. Ber-Tolox	311.3	662	52	14	57	26	3

Tabla 10. Características de la zona de peridotitas de S. Bermeja-Tolox.

#### 3.2.1. Precipitación.

Se ha calculado la precipitación media en S. Bermeja-Tolox cómo se ha descrito en la metodología, resultando los valores de la siguiente tabla:

	P. año seco (mm)	P. año medio (mm)	P. año húmedo (mm)
S. Ber-Tolox	481	992	2165

Tabla 11. Años tipo de precipitación en las peridotitas de S. Bermeja-Tolox.

En el periodo 1980-2014, la precipitación media en la zona es de 992 mm/año, con un valor de 481 mm/año, en el año de tipo seco, y, 2165 mm/año, en el año de tipo húmedo.

En la *figura 16* se representa la precipitación media mensual de un año de tipo medio. Los meses más lluviosos son los de Noviembre (174 mm), Diciembre (177 mm) y Enero (127 mm) mientras los más secos se corresponden con Julio (1 mm) y Agosto (8 mm), durante los que apenas se registra precipitación.

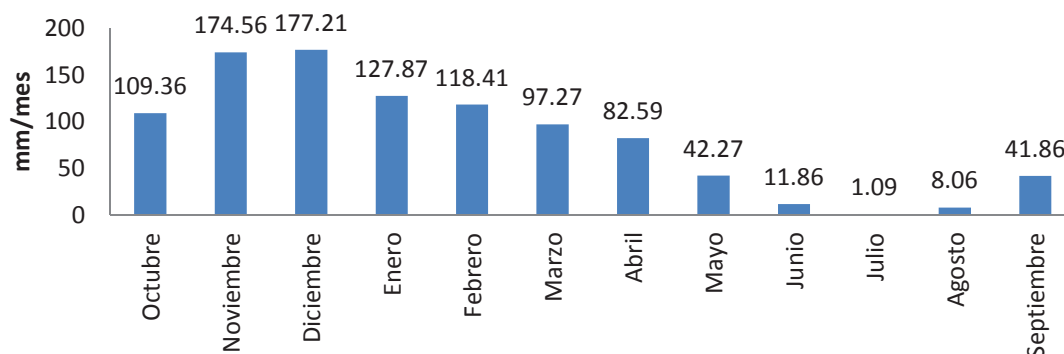


Figura 16. Precipitación media mensual para el año tipo medio de la S. Bermeja-Tolox.

En las figuras siguientes (*figuras 17 y 18*) se puede observar la distribución temporal de la precipitación lo largo del periodo de estudio (1980-2014). Se observa una tendencia de aumento en la cantidad de precipitación durante el periodo de estudio.

En la serie de 35 años de datos diarios, resultan las siguientes intensidades medias diarias de precipitación en la S. Bermeja-Tolox (*tabla 12*):

1980-2014	Total	P>5	P>10	P>20	P>50	P>100	P>200
<b>Días al Año</b>	97.11	43.31	29.60	16.20	3.31	0.34	0.00
<b>Probabilidad</b>	0.2659	0.1186	0.0810	0.0444	0.0091	0.0009	0.0000
<b>Periodo retorno días</b>	3.8	8.4	12.3	22.5	110.2	1065.3	0.0
<b>Periodo retorno años</b>	0.01	0.02	0.03	0.06	0.30	2.92	0.00
<b>Promedio</b>	2.72						
<b>Desv. Estandar</b>	9.25						
<b>Promedio días lluvia</b>	10.22						

Tabla 12. Intensidad diaria de la precipitación en S. Bermeja-Tolox.

El total pluviométrico anual se produce en 97 días al año. De estos 97 días, 29,6 días al año la intensidad de la lluvia es mayor a 10 mm/día y solo en 16,2 días al año es superior a 20 mm/día. Intensidades superiores a los 50 mm/día sólo ocurren 3,31 días al año. Episodios con intensidades superiores a 100 mm/día ocurren con un periodo de retorno de 2,92 años, mientras que los superiores a 200 mm/día no se han producido en el periodo 1980-2014.

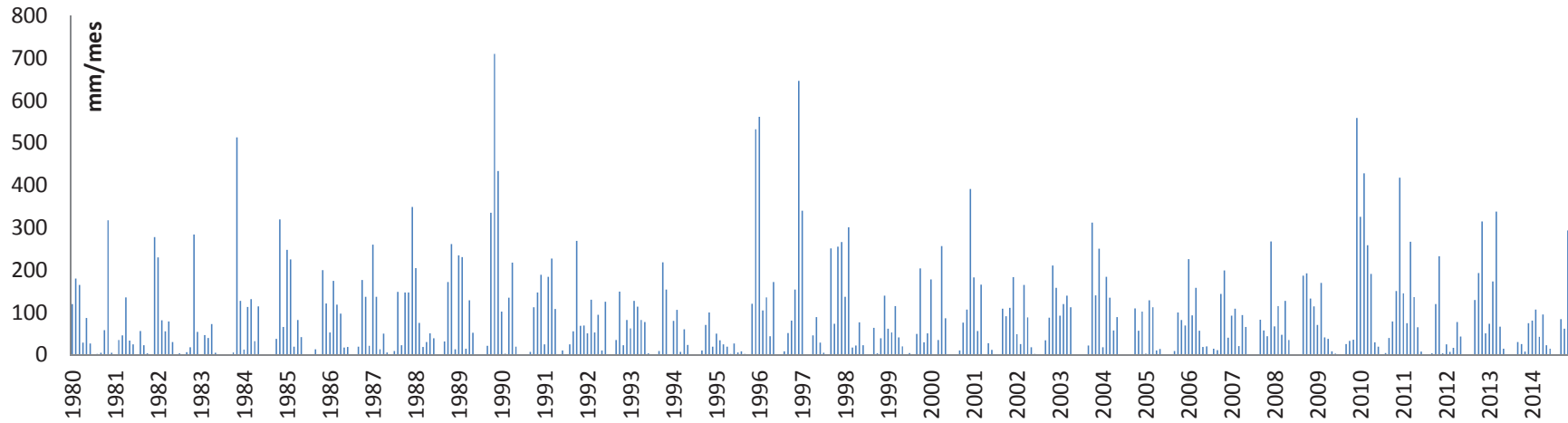


Figura 17. Precipitación mensual para el periodo de estudio de S. Bermeja-Tolox.

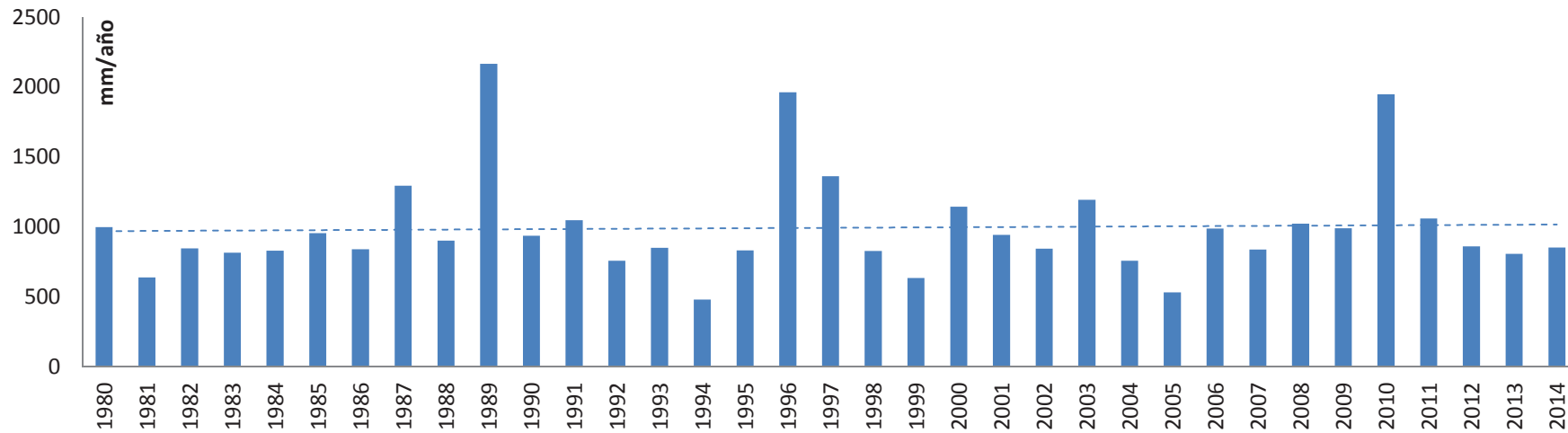


Figura 18. Precipitación anual para el periodo de estudio de S. Bermeja-Tolox.

### 3.2.2. Temperatura.

Se ha calculado la temperatura media en S. Bermeja-Tolox, obteniéndose los valores medios de los años tipo de la *tabla 13*.

	TMED año frio (°C)	TMED año medio (°C)	TMED año cálido (°C)
S. Ber-Tol	14,14	16,58	21,93

Tabla 13. Años tipo de temperatura media en las peridotitas de S. Bermeja-Tolox.

De este modo, en el periodo 1980-2014, la temperatura media en S. Bermeja-Tolox es de 16,58 °C en el año tipo medio, con los valores de 14,14 °C correspondientes al año de tipo frio y 21,93 °C en el de tipo cálido.

En la *figura 19* se representa la temperatura media mensual del año de tipo medio. El mes más frío es Enero (10,44 °C) mientras que el más cálido es Agosto (24,01 °C), con una amplitud térmica anual de 13,57 °C.

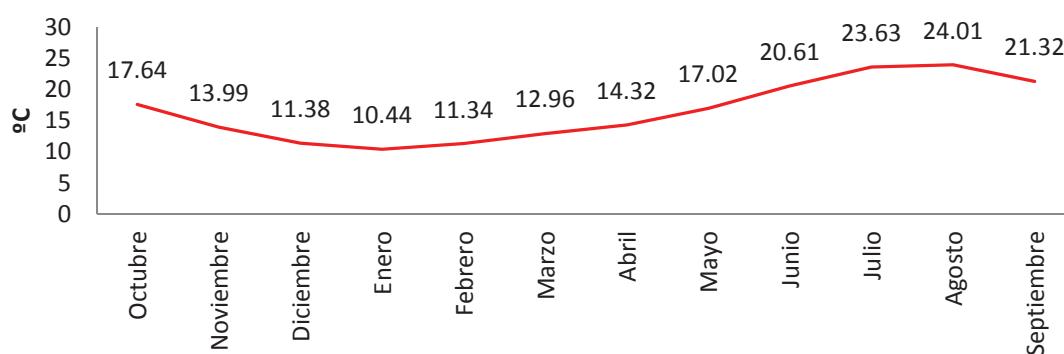


Figura 19. Temperatura media mensual para el año tipo medio en las peridotitas de S. Bermeja-Tolox.

En la figura siguiente (*figura 20*) se puede observar la distribución temporal de la temperatura media mensual a lo largo del periodo de estudio (1980-2014).



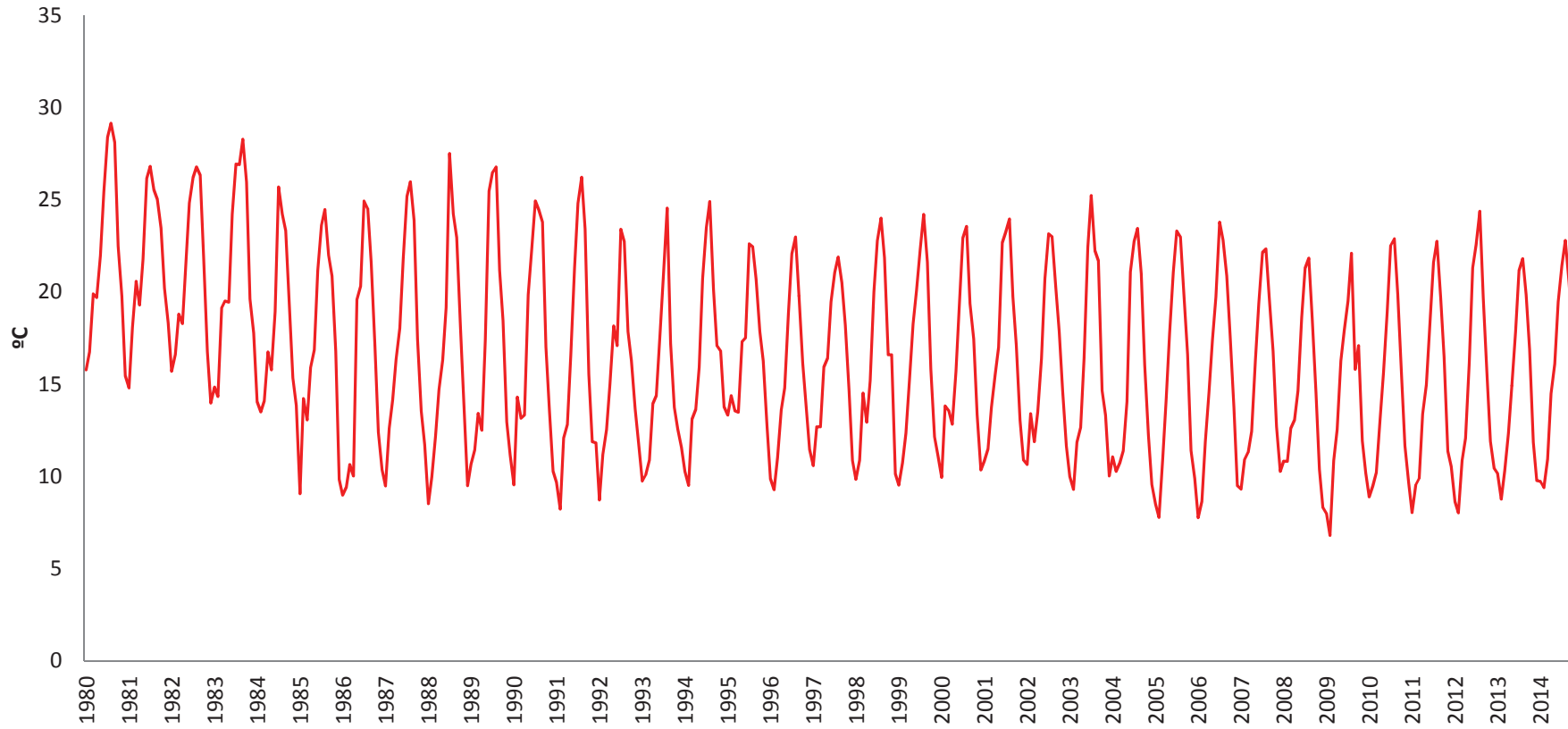


Figura 20. Temperatura mensual para el periodo de estudio en las peridotitas de S. Bermeja-Tolox.

### 3.2.3. Evapotranspiración potencial.

Los valores medios de los años tipo de la ETP en S. Bermeja-Tolox, que se recogen en la siguiente tabla:

	ETP año frio (mm)	ETP año medio (mm)	ETP año cálido (mm)
S. Ber-Tol	857	1247	1806

Tabla 14. Años tipo de ETP (Hargreaves) en S. Bermeja-Tolox.

La ETP media en la zona es de 1247 mm/año, con valores extremos de 857 mm/año y 1806 mm/año.

El mes con menor ETP es Diciembre (42 mm) mientras que el mes con la ETP más elevada es Julio (177 mm) (figura 21).

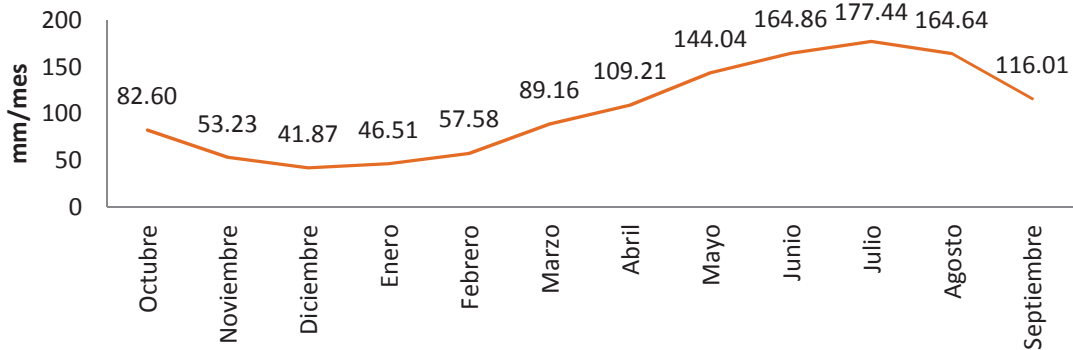


Figura 21. ETP (Hargreaves) media mensual para el año tipo medio de S. Bermeja-Tolox.

### 3.2.4. Balance agua en el suelo.

Los balances de agua en el suelo se han realizado aplicando el modelo de Thornthwaite a los datos contenidos en las series de precipitación y ETP diarias, esta última calculada con la expresión de Hargreaves. Se han utilizado capacidades de retención de agua en el suelo de 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 mm. Para el cálculo de la infiltración se ha

usado el método del número de curva, para dos valores del umbral de escorrentía: grupos de suelo B (capacidad de infiltración moderada) y C (infiltración lenta).

En la *figuras 22, 23 y 24* se representan los valores de lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y escorrentía (ESC) en función de los diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS), para un valor de umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 30,05:

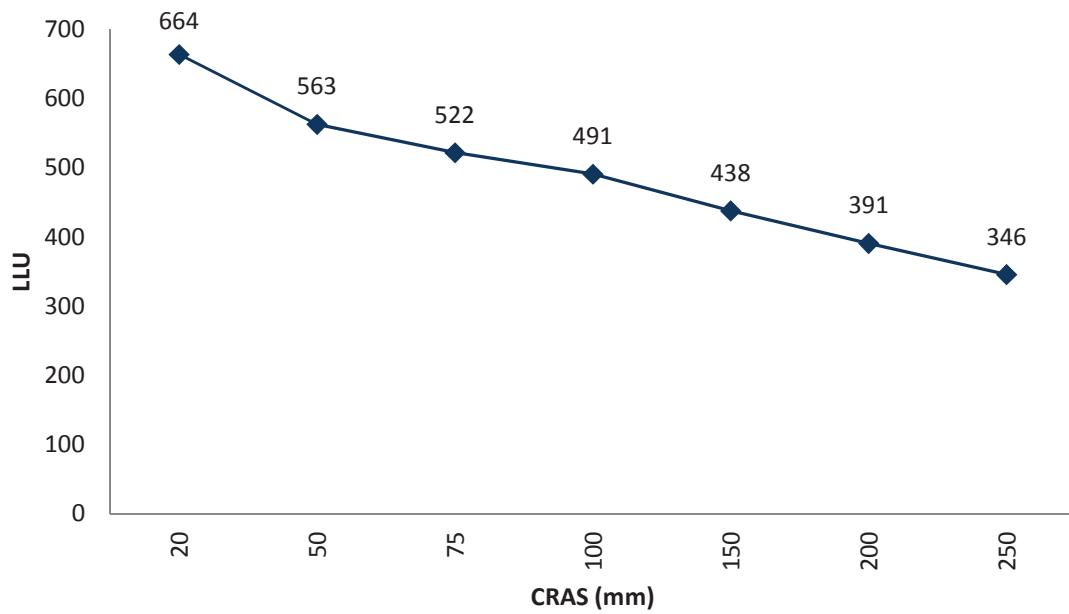


Figura 22. Lluvia útil en función de la CRAS para S. Bermeja-Tolox.

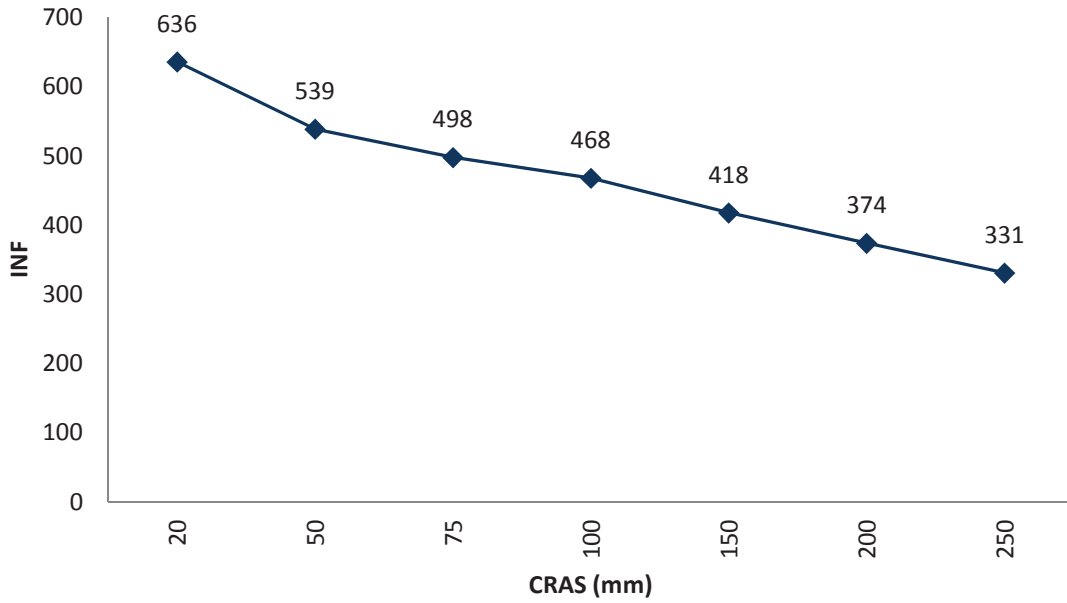


Figura 23. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 30,05 en S. Bermeja-Tolox.

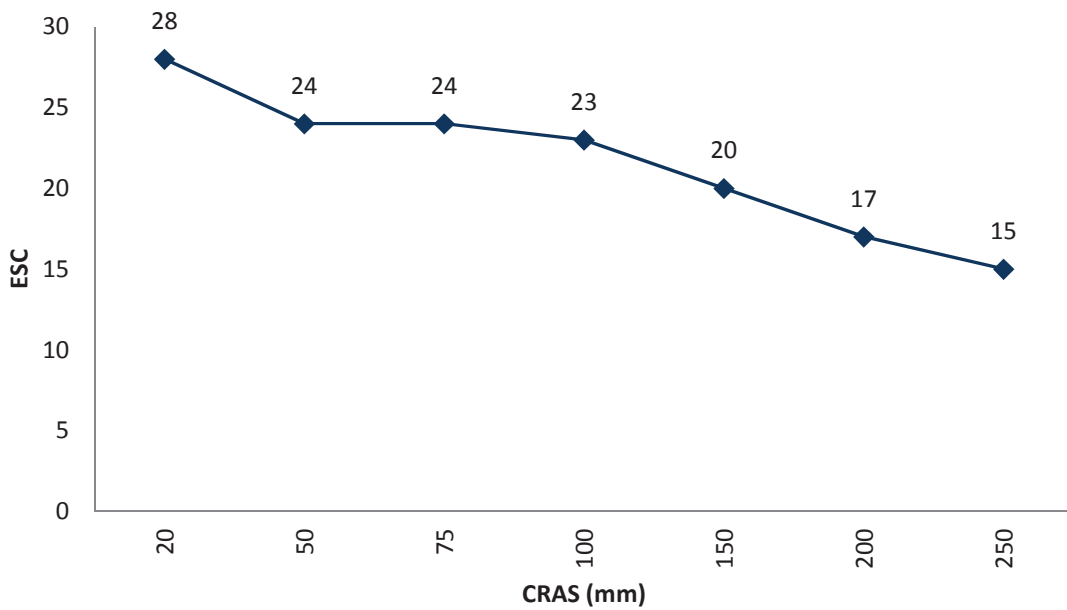


Figura 24. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 30,05 en S. Bermeja-Tolox.

En la *figuras 25*, y *26* se representan los valores de INF y ESC en función de la CRAS, para un valor de umbral de escorrentía de 19,23:

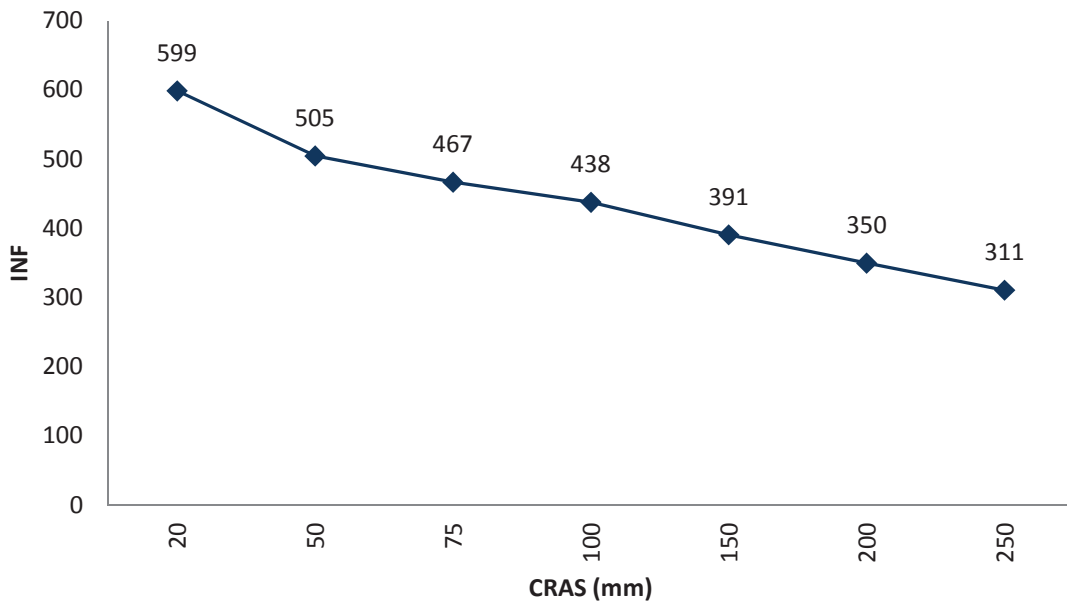


Figura 25. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 19,23 en S. Bermeja-Tolox.

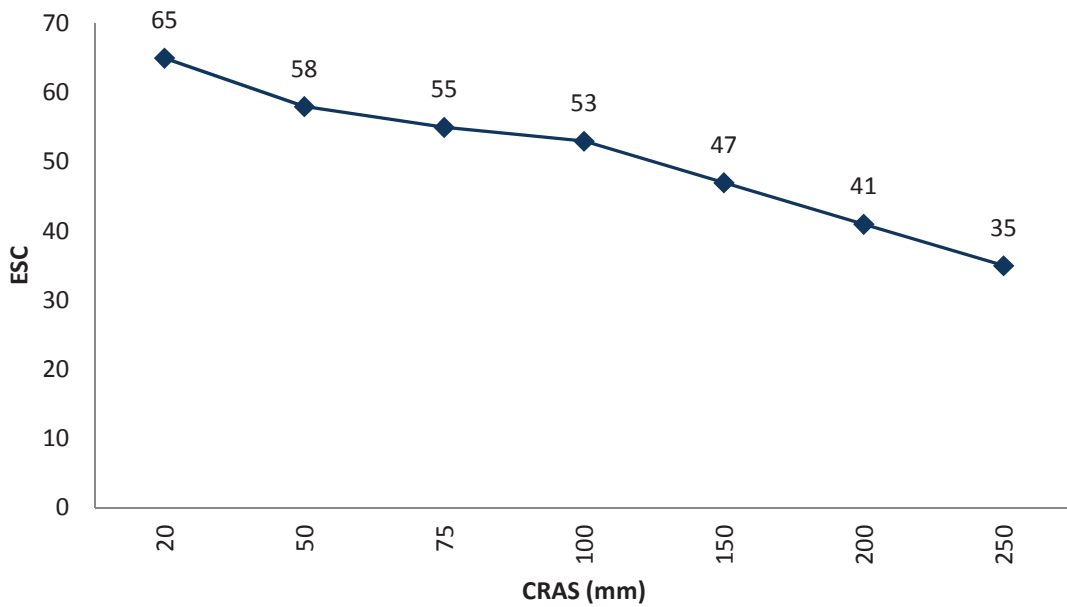


Figura 26. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 19,23 en S. Bermeja-Tolox.

Se observa como es lógico que los valores de lluvia útil, infiltración y escorrentía descienden al aumentar el valor de la CRAS, y que un mayor umbral de escorrentía supone una mayor infiltración y una menor escorrentía.

### 3.3. Sierra Aguas.

Las peridotitas de Sierra Aguas abarcan una superficie de 28,86 km<sup>2</sup> y tiene una altitud media de 547 m.s.n.m. En la *tabla 15* se exponen las características de las peridotitas de S. Aguas:

	Area (km <sup>2</sup> )	Altitud med (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Arbolado (%)	Matorral (%)	Pastizal (%)	Cultivo (%)
S. Aguas	28.86	547	51	5	81	12	2

Tabla 15. Características de la zona de peridotitas de S. Aguas.

#### 3.3.1. Precipitación.

Se ha calculado la precipitación media en S. Aguas cómo se ha descrito en la metodología, resultando los valores de la siguiente tabla:

	P. año seco (mm)	P. año medio (mm)	P. año húmedo (mm)
S. Aguas	302	643	1712

Tabla 16. Años tipo de precipitación en las peridotitas de S. Aguas.

En el periodo 1980-2014, la precipitación media en la zona es de 643 mm/año, con un valor de 302 mm/año, en el año de tipo seco, y, 1712 mm/año, en el año de tipo húmedo.

En la *figura 27* se representa la precipitación media mensual de un año de tipo medio. Los meses más lluviosos son los de Noviembre (125 mm) y Diciembre (99 mm) mientras los más secos se corresponden con Julio (0,7 mm) y Agosto (6 mm), durante los que apenas se registra precipitación.

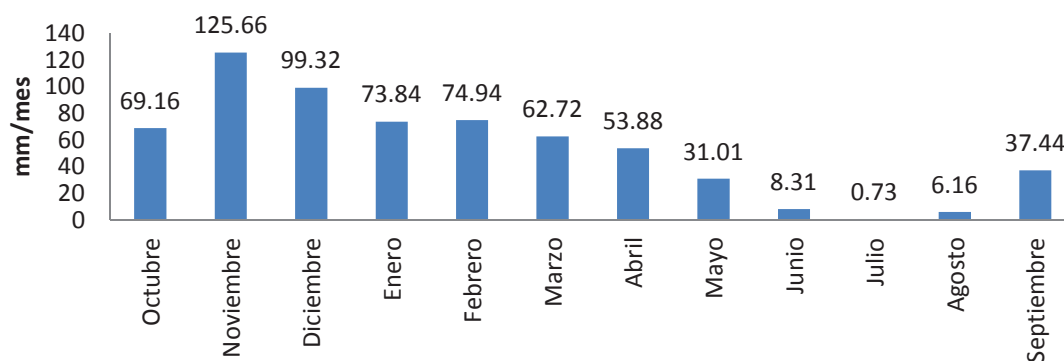


Figura 27. Precipitación media mensual para el año tipo medio de la S. Aguas.

En las figuras siguientes (*figuras 28 y 29*) se puede observar la distribución temporal de la precipitación lo largo del periodo de estudio (1980-2014). Se observa una tendencia de aumento en la cantidad de precipitación durante el periodo de estudio.

En la serie de 35 años de datos diarios, resultan las siguientes intensidades medias diarias de precipitación en la S. Aguas (*tabla 17*):

1980-2014	Total	P>5	P>10	P>20	P>50	P>100	P>200
<b>Días al Año</b>	72.49	30.20	18.86	9.20	2.03	0.17	0.03
<b>Probabilidad</b>	0.1985	0.0827	0.0516	0.0252	0.0056	0.0005	0.0001
<b>Periodo retorno días</b>	5.0	12.1	19.4	39.7	180.1	2130.7	0.0
<b>Periodo retorno años</b>	0.01	0.03	0.05	0.11	0.49	5.84	0.00
<b>Promedio</b>	1.76						
<b>Desv. Estandar</b>	7.45						
<b>Promedio días lluvia</b>	8.87						

Tabla 17. Intensidad diaria de la precipitación en S. Aguas.

El total pluviométrico anual se produce en 72 días al año. De estos 72 días, 18,9 días al año la intensidad de la lluvia es mayor a 10 mm/día y solo en 9,2 días al año es superior a 20 mm/día. Intensidades superiores a los 50 mm/día sólo ocurren 2,03 días al año. Episodios con intensidades superiores a 100 mm/día ocurren con un periodo de retorno de 5,84 años.

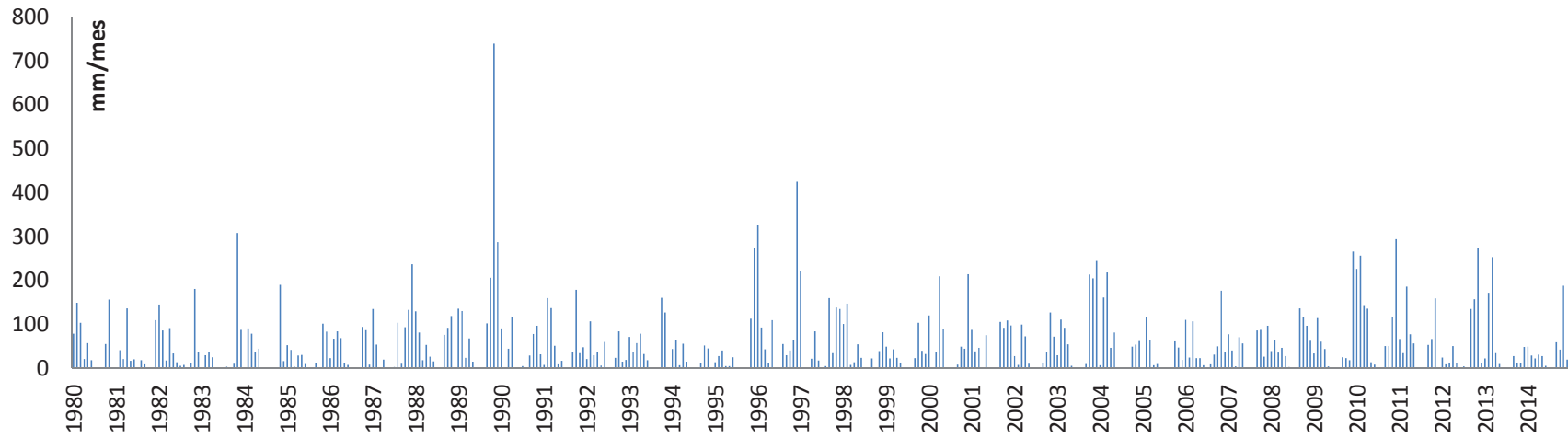


Figura 28. Precipitación mensual para el periodo de estudio de S. Aguas.

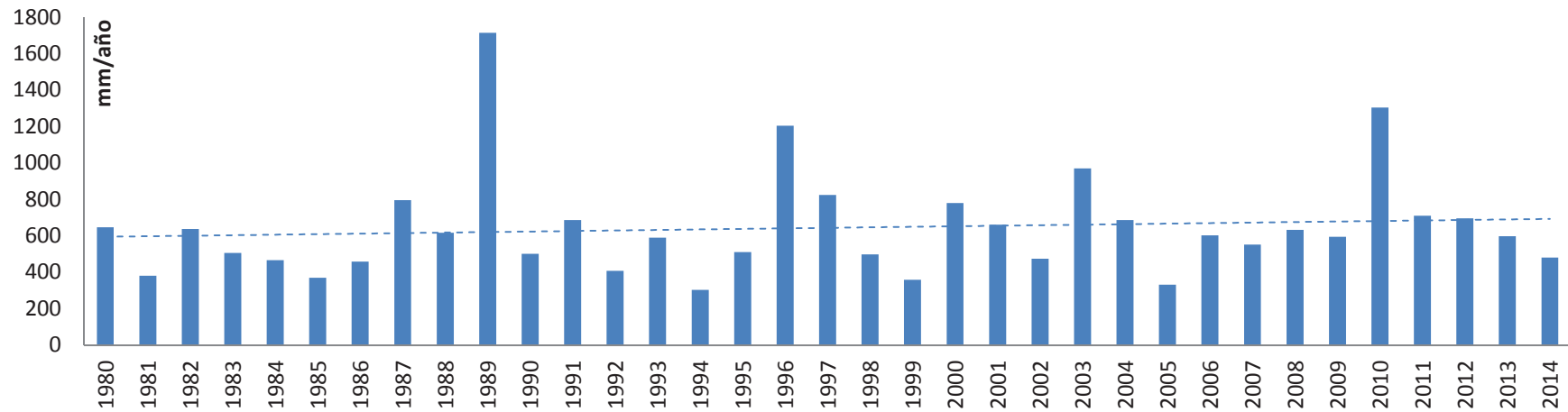


Figura 29. Precipitación anual para el periodo de estudio de S. Aguas.



### 3.3.2. Temperatura.

Se ha calculado la temperatura media en S. Aguas, obteniéndose los valores medios de los años tipo de la *tabla 18*.

	TMED año frio (°C)	TMED año medio (°C)	TMED año cálido (°C)
S. Aguas	15,59	17,24	20,12

Tabla 18. Años tipo de temperatura media en las peridotitas de S. Aguas.

De este modo, en el periodo 1980-2014, la temperatura media en S. Aguas es de 17,24 °C en el año tipo medio, con los valores de 15,59 °C correspondientes al año de tipo frio y 20,12 °C en el de tipo cálido.

En la *figura 30* se representa la temperatura media mensual del año de tipo medio. El mes más frío es Enero (10,00 °C) mientras que el más cálido es Agosto (25,64 °C), con una amplitud térmica anual de 15,64 °C.

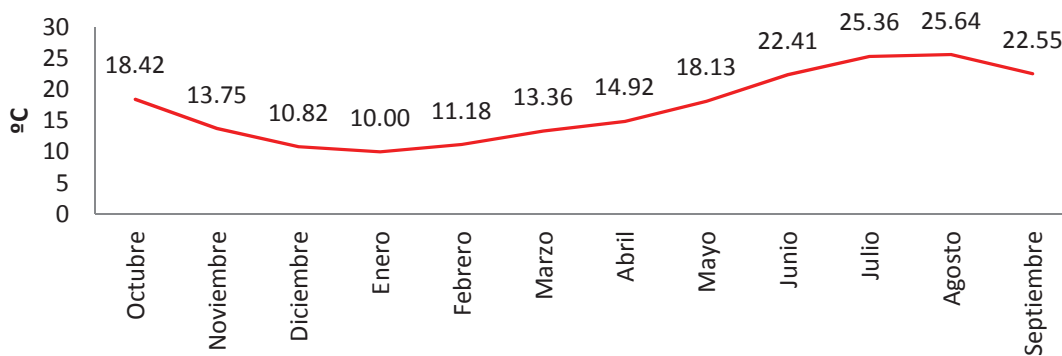


Figura 30. Temperatura media mensual para el año tipo medio en las peridotitas de S. Aguas.

En la figura siguiente (*figura 31*) se puede observar la distribución temporal de la temperatura media mensual a lo largo del periodo de estudio (1980-2014).

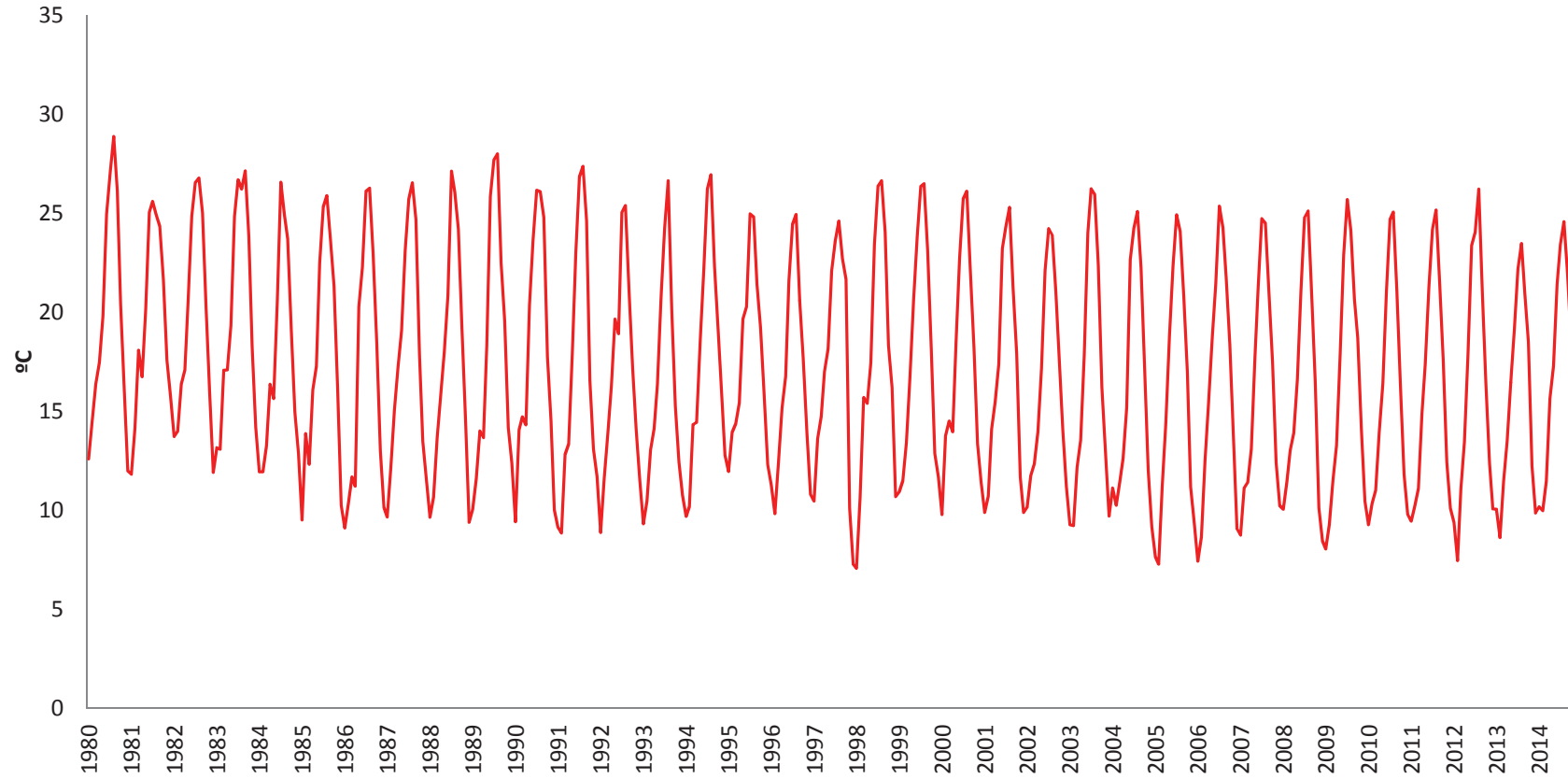


Figura 31. Temperatura mensual para el periodo de estudio en las peridotitas de S. Aguas.

### 3.3.3. Evapotranspiración potencial.

Los valores medios de los años tipo de la ETP en S. Aguas, que se recogen en la siguiente tabla:

	ETP año frio (mm)	ETP año medio (mm)	ETP año cálido (mm)
S. Aguas	1273	1439	1739

Tabla 19. Años tipo de ETP (Hargreaves) en S. Aguas.

La ETP media en la zona es de 1439 mm/año, con valores extremos de 1273 mm/año y 1739 mm/año.

El mes con menor ETP es Diciembre (44 mm) mientras que el mes con la ETP más elevada es Julio (212 mm) (figura 32).

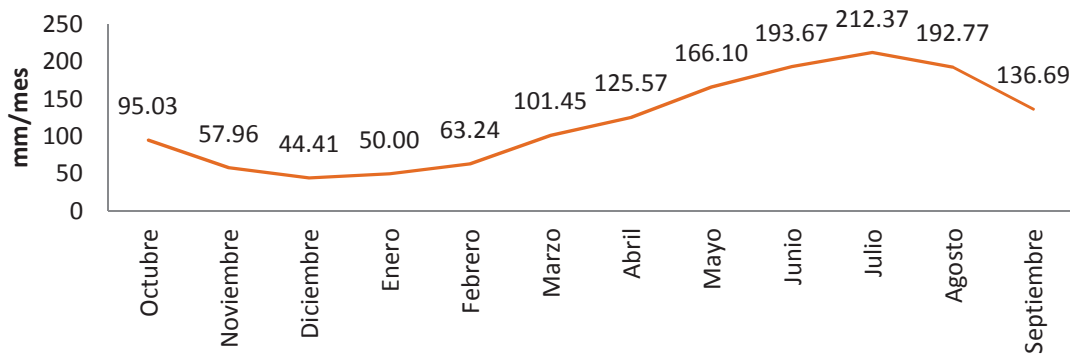


Figura 32. ETP (Hargreaves) media mensual para el año tipo medio de S. Aguas.

### 3.3.4. Balance agua en el suelo.

Los balances de agua en el suelo se han realizado aplicando el modelo de Thornthwaite a los datos contenidos en las series de precipitación y ETP diarias, esta última calculada con la expresión de Hargreaves. Se han utilizado capacidades de retención de agua en el suelo de 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 mm. Para el cálculo de la infiltración se ha

usado el método del número de curva, para dos valores del umbral de escorrentía: grupos de suelo B (capacidad de infiltración moderada) y C (infiltración lenta).

En la *figuras 33, 34 y 35* se representan los valores de lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y escorrentía (ESC) en función de los diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS), para un valor de umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 31,87:

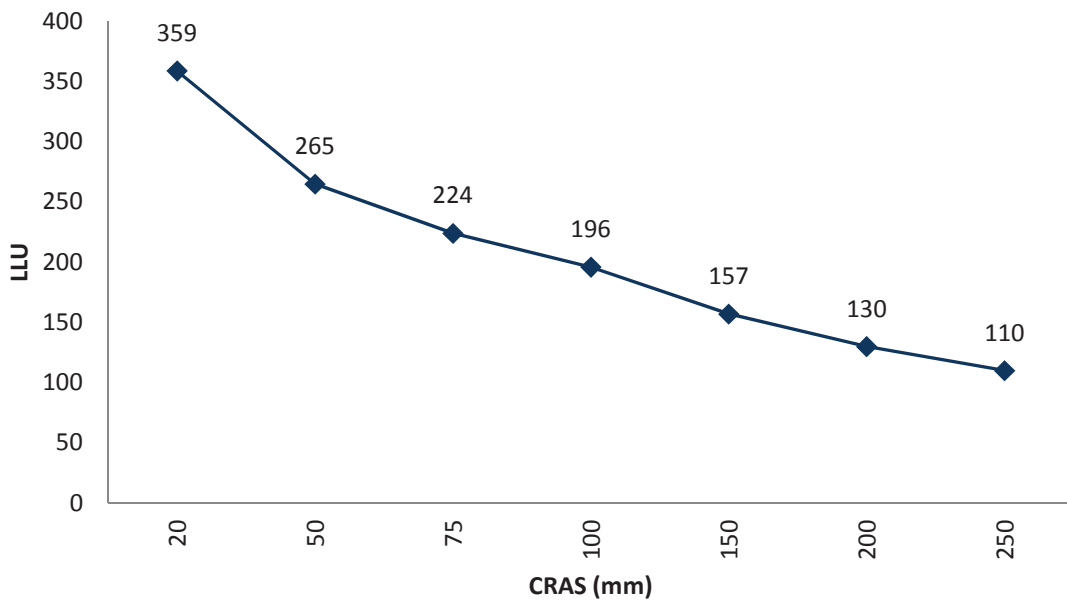


Figura 33. Lluvia útil en función de la CRAS para S. Aguas.

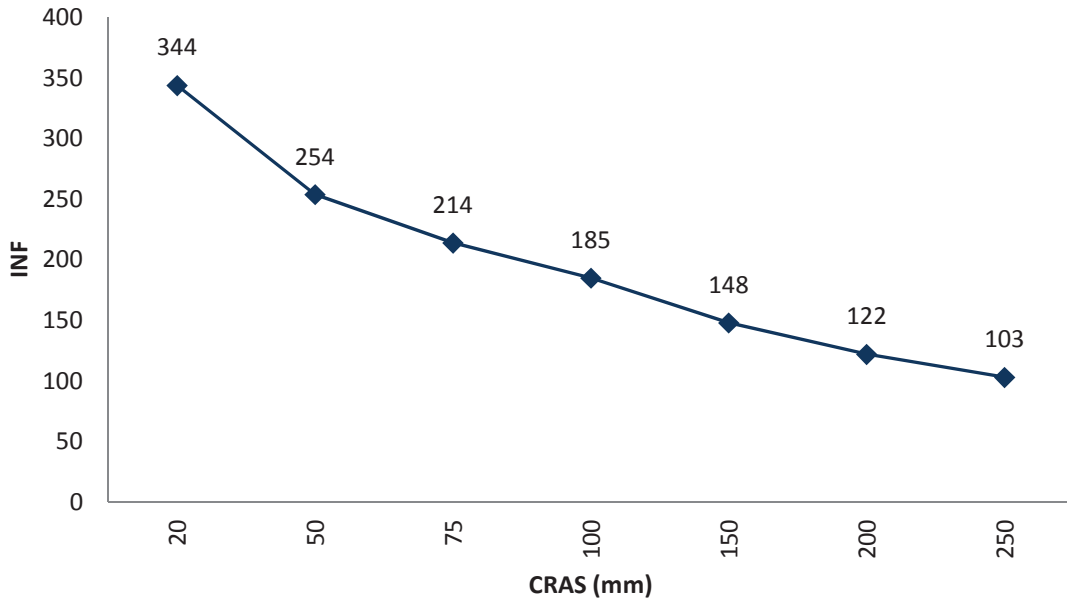


Figura 34. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 31,87 en S. Aguas.

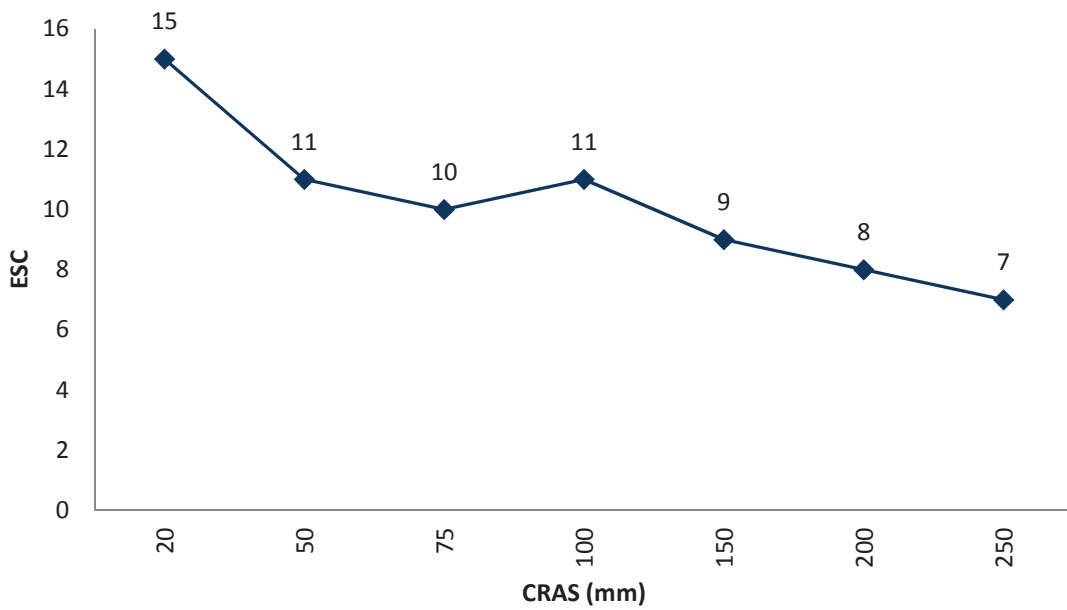


Figura 35. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 31,87 en S. Aguas.

En la *figuras 36*, y *37* se representan los valores de INF y ESC en función de la CRAS, para un valor de umbral de escorrentía de 20,51:

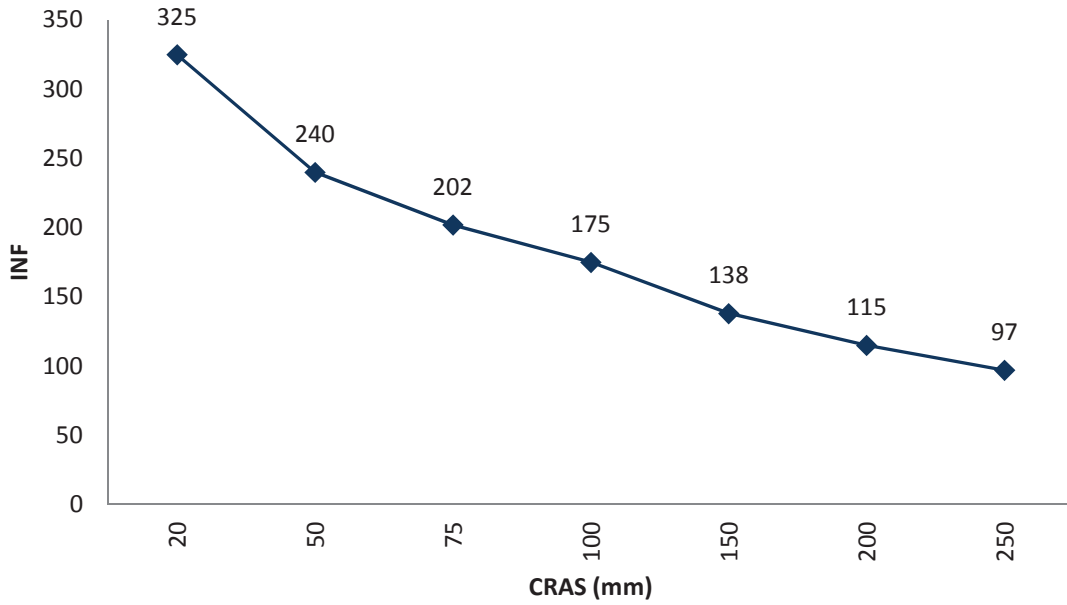


Figura 36. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 20,51 en S. Aguas.

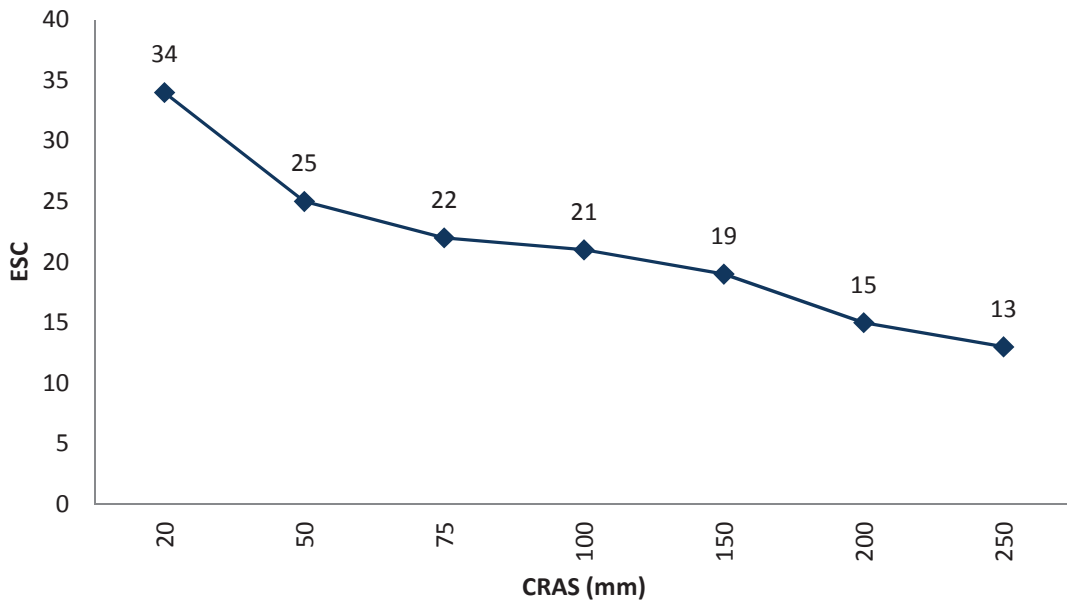


Figura 37. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 20,51 en S. Aguas.

Se observa como es lógico que los valores de lluvia útil, infiltración y escorrentía descenden al aumentar el valor de la CRAS, y que un mayor umbral de escorrentía supone una mayor infiltración y una menor escorrentía.

### 3.4. Sierra de la Robla.

Las peridotitas de Sierra de la Robla abarcan una superficie 7,41 km<sup>2</sup> y tiene una altitud media de 368 m.s.n.m. En la *tabla 20* se exponen las características de las peridotitas de S. de la Robla:

	Area (km <sup>2</sup> )	Altitud med (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Arbolado (%)	Matorral (%)	Pastizal (%)	Cultivo (%)
<b>S. Robla</b>	7.41	368	44	36	46	12	6

Tabla 20. Características de la zona de peridotitas de S. de la Robla.

#### 3.4.1. Precipitación.

Se ha calculado la precipitación media en S. de la Robla cómo se ha descrito en la metodología, resultando los valores de la siguiente tabla:

	P. año seco (mm)	P. año medio (mm)	P. año húmedo (mm)
<b>S. Robla</b>	251	544	1444

Tabla 21. Años tipo de precipitación en las peridotitas de S. de la Robla.

En el periodo 1980-2014, la precipitación media en la zona es de 544 mm/año, con un valor de 251 mm/año, en el año de tipo seco, y, 1444 mm/año, en el año de tipo húmedo.

En la *figura 38* se representa la precipitación media mensual de un año de tipo medio. Los meses más lluviosos son los de Noviembre (106 mm), Diciembre (84 mm) y Enero (127 mm) mientras los más secos se corresponden con Julio (0,6 mm) y Agosto (5 mm), durante los que apenas se registra precipitación.

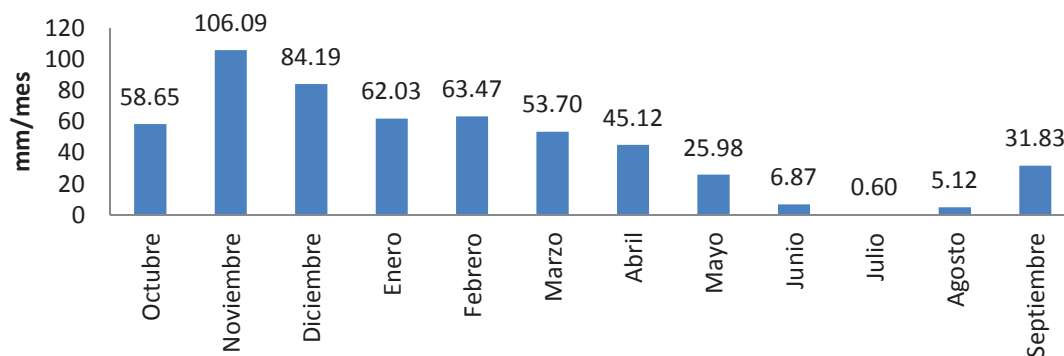


Figura 38. Precipitación media mensual para el año tipo medio de la S. de la Robla.

En las figuras siguientes (*figuras 39 y 40*) se puede observar la distribución temporal de la precipitación lo largo del periodo de estudio (1980-2014). Se observa una tendencia de aumento en la cantidad de precipitación durante el periodo de estudio.

En la serie de 35 años de datos diarios, resultan las siguientes intensidades medias diarias de precipitación en la S. de la Robla (*tabla 22*):

1980-2014	Total	P>5	P>10	P>20	P>50	P>100	P>200
<b>Días al Año</b>	72.49	27.49	16.43	7.57	1.17	0.14	0.00
<b>Probabilidad</b>	0.1985	0.0753	0.0450	0.0207	0.0032	0.0004	0.0000
<b>Periodo retorno días</b>	5.0	13.3	22.2	48.2	311.8	2556.8	0.0
<b>Periodo retorno años</b>	0.01	0.04	0.06	0.13	0.85	7.00	0.00
<b>Promedio</b>	1.49						
<b>Desv. Estandar</b>	6.31						
<b>Promedio días lluvia</b>	7.50						

Tabla 22. Intensidad diaria de la precipitación en S. de la Robla.

El total pluviométrico anual se produce en 72,5 días al año. De estos 72,5 días, 16,4 días al año la intensidad de la lluvia es mayor a 10 mm/día y solo en 7,6 días al año es superior a 20 mm/día. Intensidades superiores a los 50 mm/día sólo ocurren 1,17 días al año. Episodios con intensidades superiores a 100 mm/día ocurren con un periodo de retorno de 7 años, mientras que los superiores a 200 mm/día no se han producido en el periodo 1980-2014.



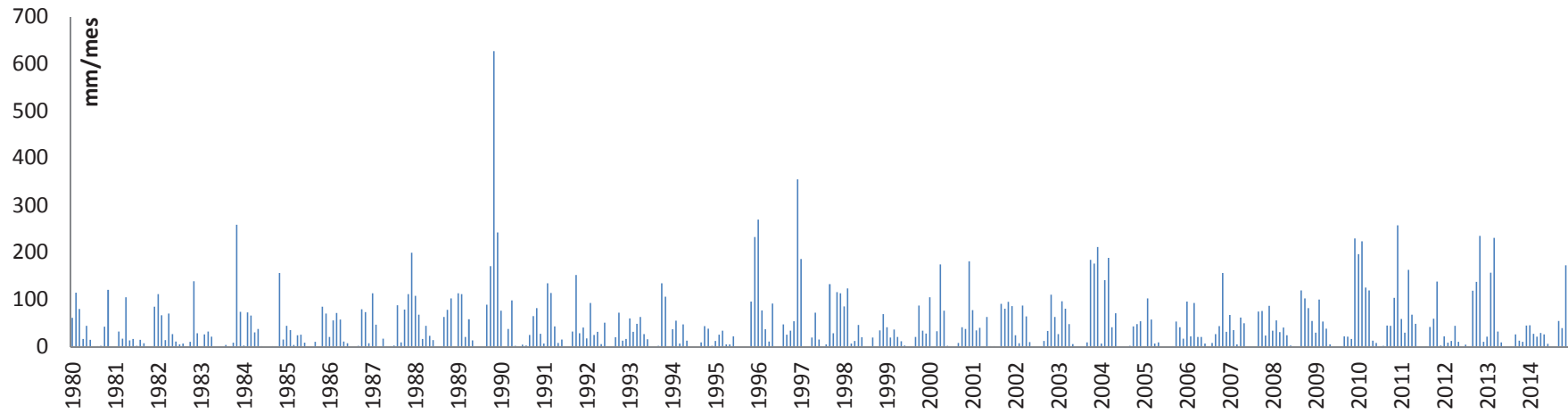


Figura 39. Precipitación mensual para el periodo de estudio de S. de la Robla.

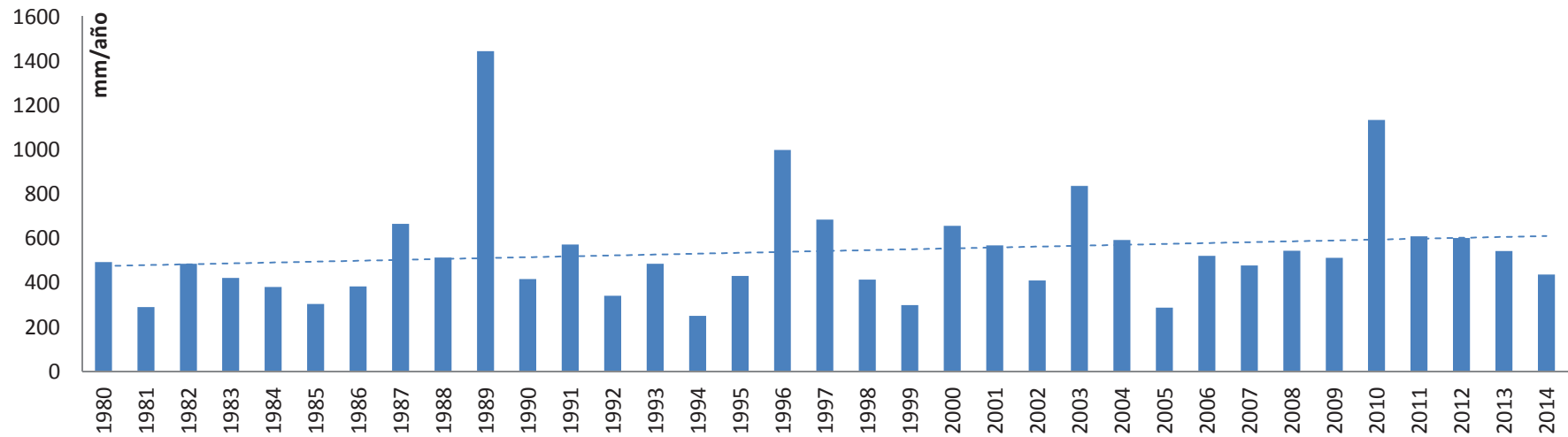


Figura 40. Precipitación anual para el periodo de estudio de S. de la Robla.

### 3.4.2. Temperatura.

Se ha calculado la temperatura media en S. de la Robla, obteniéndose los valores medios de los años tipo de la *tabla 23*.

	TMED año frio (°C)	TMED año medio (°C)	TMED año cálido (°C)
<b>S. Robla</b>	15,82	18,43	23,63

Tabla 23. Años tipo de temperatura media en las peridotitas de S. de la Robla.

De este modo, en el periodo 1980-2014, la temperatura media en S. de la Robla es de 18,43 °C en el año tipo medio, con los valores de 15,82 °C correspondientes al año de tipo frio y 23,63 °C en el de tipo cálido.

En la *figura 41* se representa la temperatura media mensual del año de tipo medio. El mes más frío es Enero (11,53 °C) mientras que el más cálido es Agosto (26,43 °C), con una amplitud térmica anual de 12,86 °C.

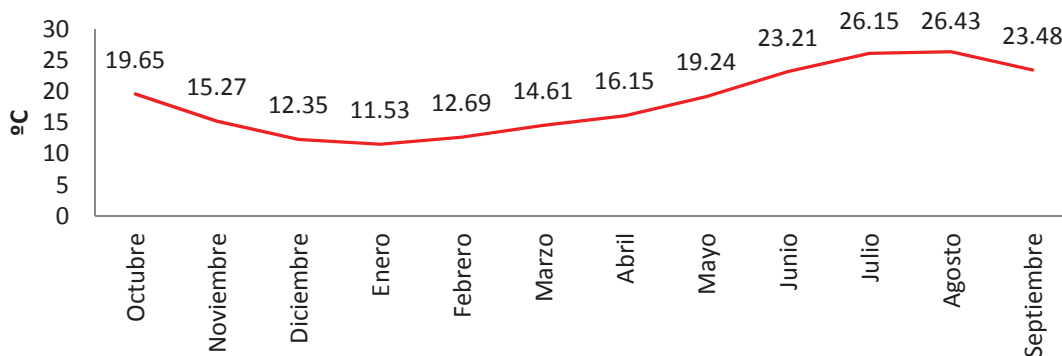


Figura 41. Temperatura media mensual para el año tipo medio en las peridotitas de S. de la Robla.

En la figura siguiente (*figura 42*) se puede observar la distribución temporal de la temperatura media mensual a lo largo del periodo de estudio (1980-2014).

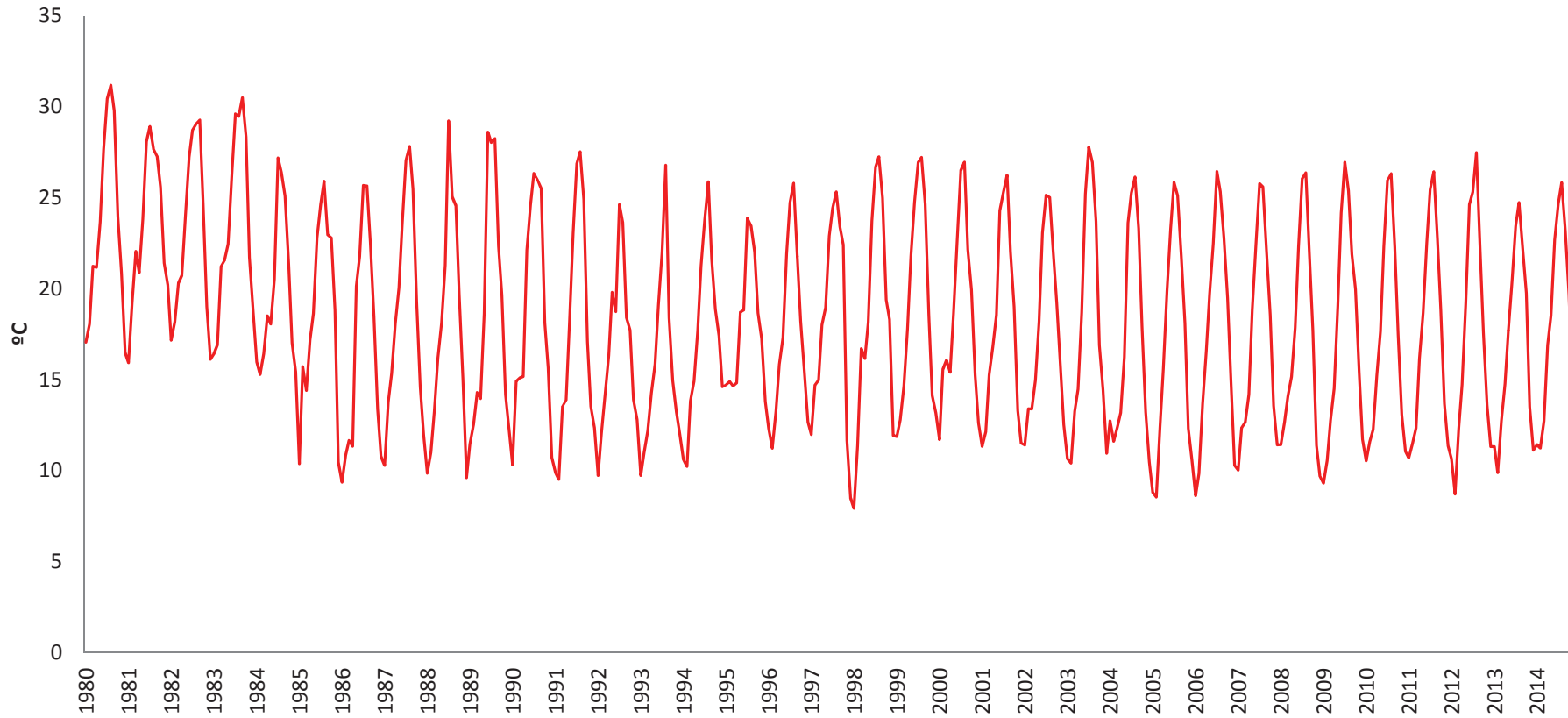


Figura 42. Temperatura mensual para el periodo de estudio en las peridotitas de S. de la Robla.

### 3.4.3. Evapotranspiración potencial.

Los valores medios de los años tipo de la ETP en S. de la Robla, que se recogen en la siguiente tabla:

	ETP año frio (mm)	ETP año medio (mm)	ETP año cálido (mm)
S. Robla	1063	1461	1995

Tabla 24. Años tipo de ETP (Hargreaves) en S. de la Robla.

La ETP media en la zona es de 1461 mm/año, con valores extremos de 1063 mm/año y 1995 mm/año.

El mes con menor ETP es Diciembre (47 mm) mientras que el mes con la ETP más elevada es Julio (208 mm) (figura 43).

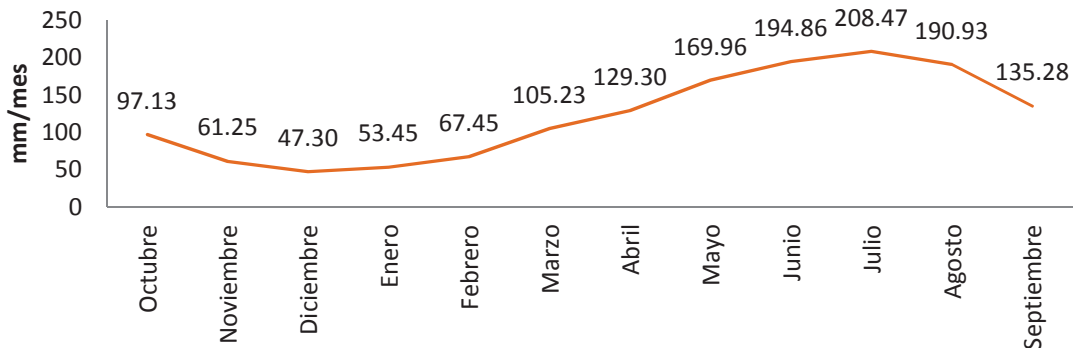


Figura 43. ETP (Hargreaves) media mensual para el año tipo medio de S. de la Robla.

### 3.4.4. Balance agua en el suelo.

Los balances de agua en el suelo se han realizado aplicando el modelo de Thornthwaite a los datos contenidos en las series de precipitación y ETP diarias, esta última calculada con la expresión de Hargreaves. Se han utilizado capacidades de retención de agua en el suelo de 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 mm. Para el cálculo de la infiltración se ha

usado el método del número de curva, para dos valores del umbral de escorrentía: grupos de suelo B (capacidad de infiltración moderada) y C (infiltración lenta).

En la *figuras 44, 45 y 46* se representan los valores de lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y escorrentía (ESC) en función de los diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS), para un valor de umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 35,14:

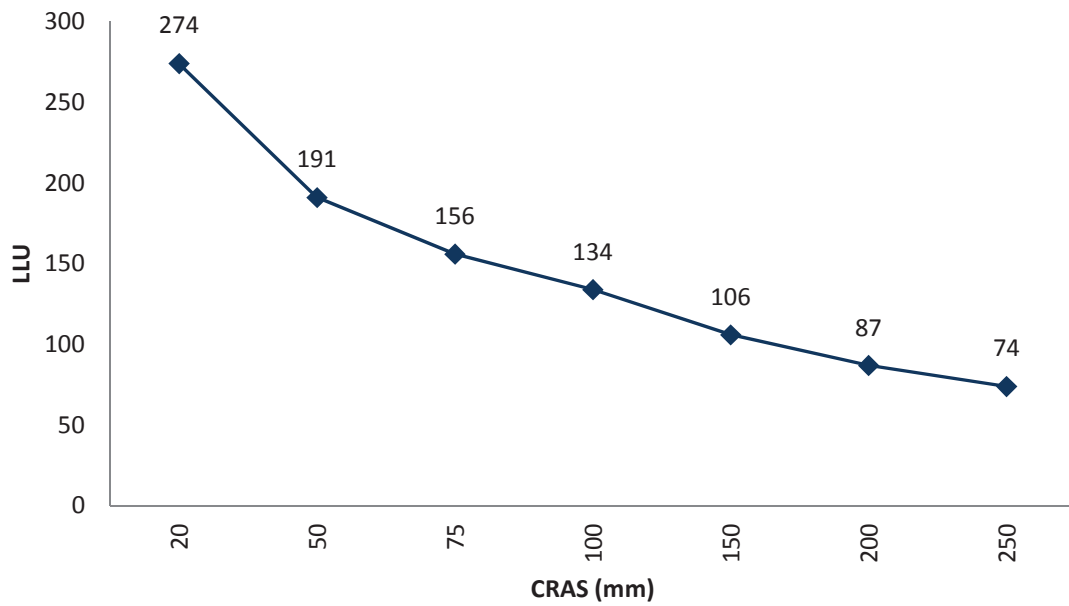


Figura 44. Lluvia útil en función de la CRAS para S. de la Robla.

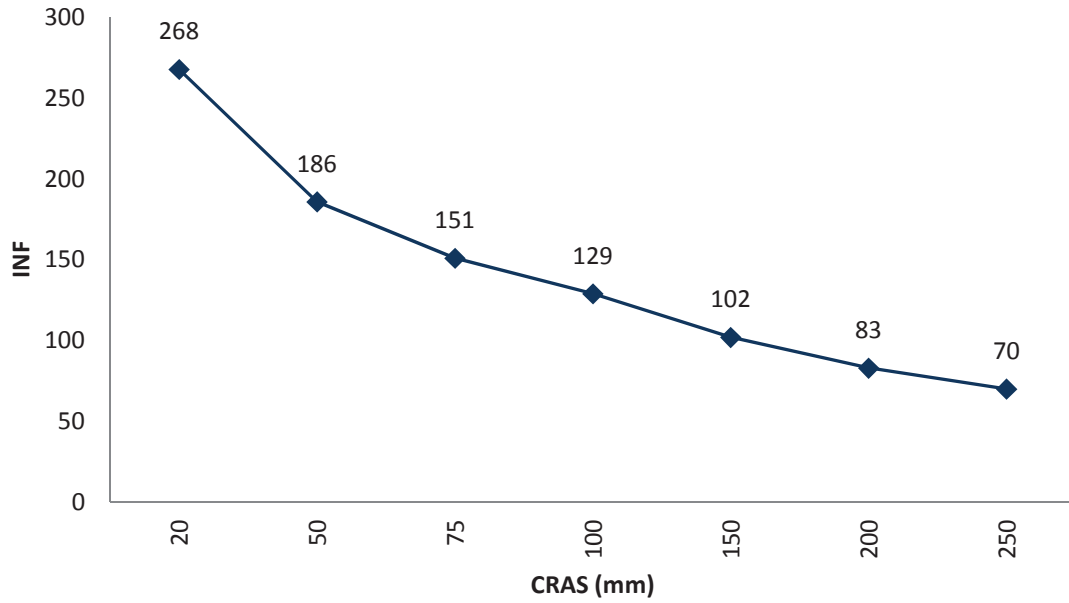


Figura 45. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 35,14 en S. de la Robla.

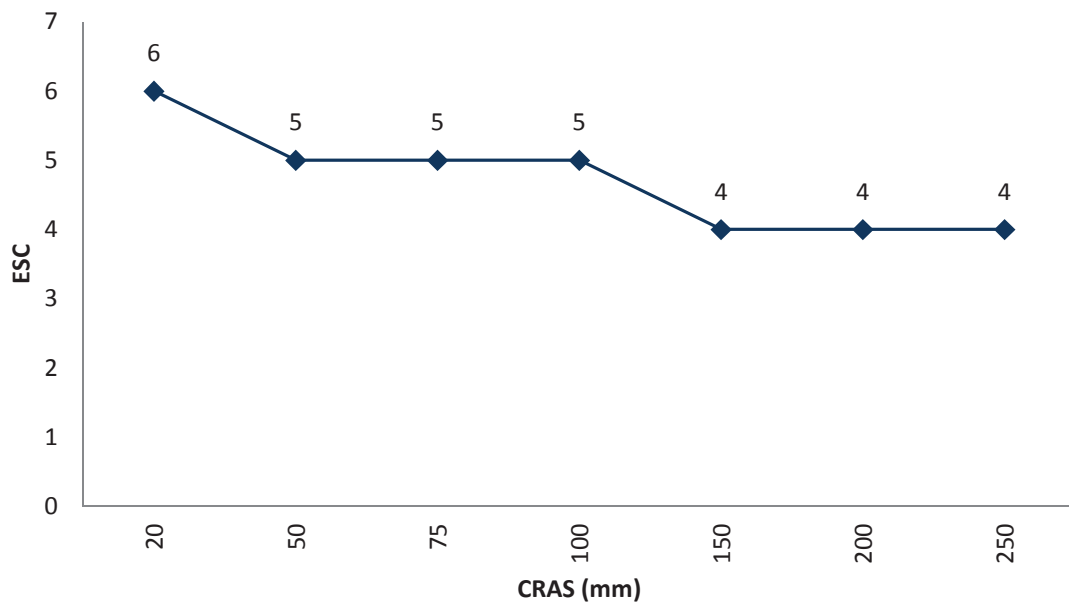


Figura 46. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 35,14 en S. de la Robla.

En la *figuras 47*, y *48* se representan los valores de INF y ESC en función de la CRAS, para un valor de umbral de escorrentía de 22,78:

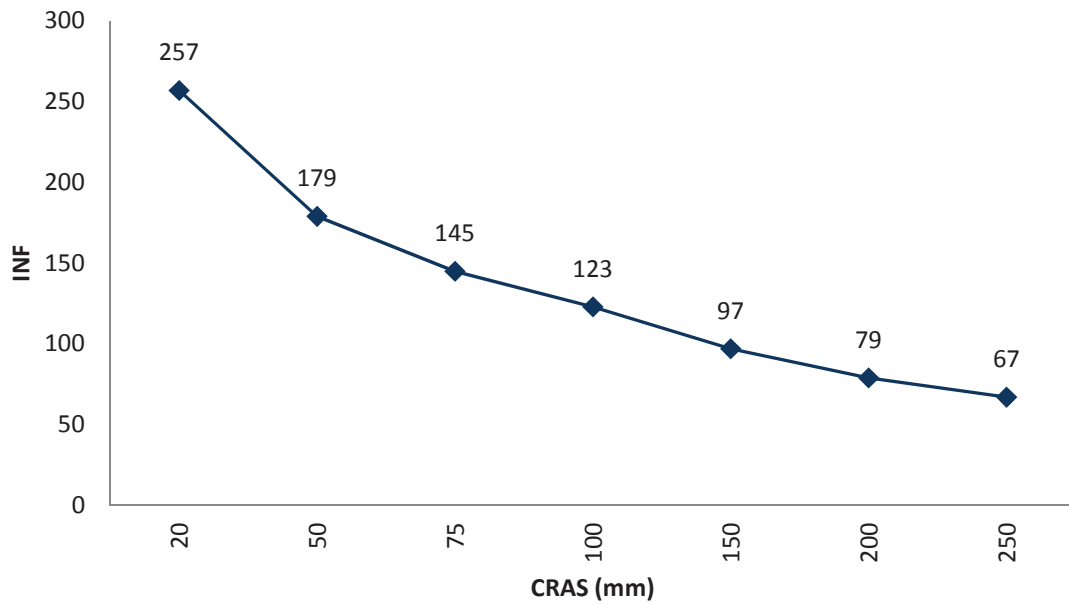


Figura 47. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 22,78 en S. de la Robla.

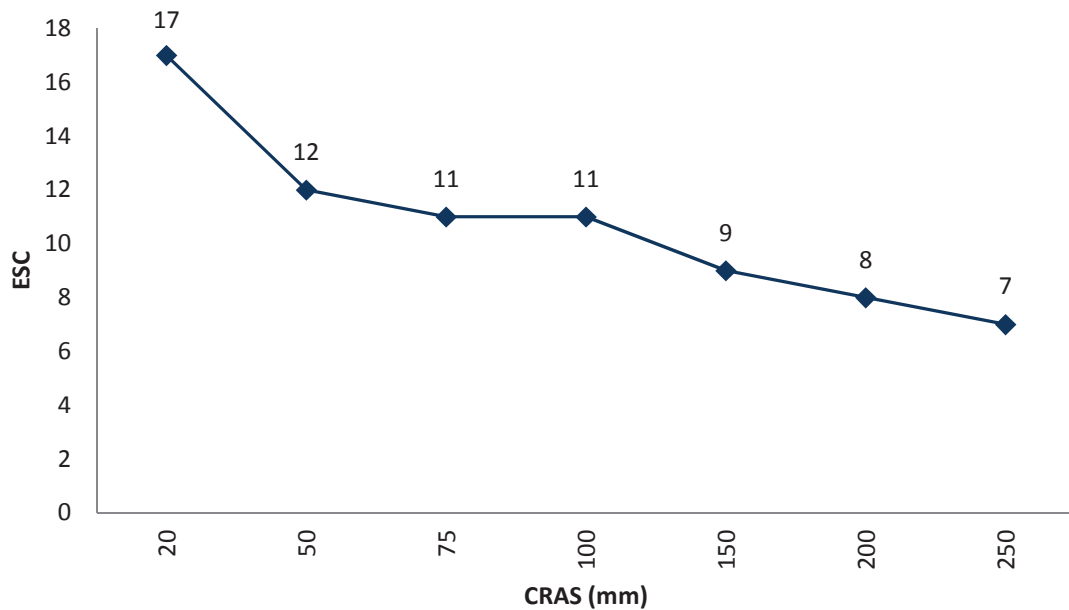


Figura 48. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 22,78 en S. de la Robla.

Se observa como es lógico que los valores de lluvia útil, infiltración y escorrentía descienden al aumentar el valor de la CRAS, y que un mayor umbral de escorrentía supone una mayor infiltración y una menor escorrentía.

### 3.5. Sierra de Mijas.

Las peridotitas de Sierra de Mijas abarcan una superficie de 6,15 km<sup>2</sup> y tiene una altitud media de 38 m.s.n.m. En la *tabla 25* se exponen las características de las peridotitas de S. de Mijas:

	Area (km <sup>2</sup> )	Altitud med (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Arbolado (%)	Matorral (%)	Pastizal (%)	Cultivo (%)
S. Mijas	6.15	38	38	2	28	39	31

Tabla 25. Características de la zona de peridotitas de S. de Mijas.

#### 3.5.1. Precipitación.

Se ha calculado la precipitación media en S. de Mijas cómo se ha descrito en la metodología, resultando los valores de la siguiente tabla:

	P. año seco (mm)	P. año medio (mm)	P. año húmedo (mm)
S. Mijas	371	677	1630

Tabla 26. Años tipo de precipitación en las peridotitas de S. de Mijas.

En el periodo 1980-2014, la precipitación media en la zona es de 677 mm/año, con un valor de 371 mm/año, en el año de tipo seco, y, 1630 mm/año, en el año de tipo húmedo.

En la *figura 49* se representa la precipitación media mensual de un año de tipo medio. Los meses más lluviosos son los de Noviembre (123 mm), Diciembre (119 mm) y Enero (127 mm) mientras los más secos se corresponden con Julio (0,5 mm) y Agosto (5 mm), durante los que apenas se registra precipitación.



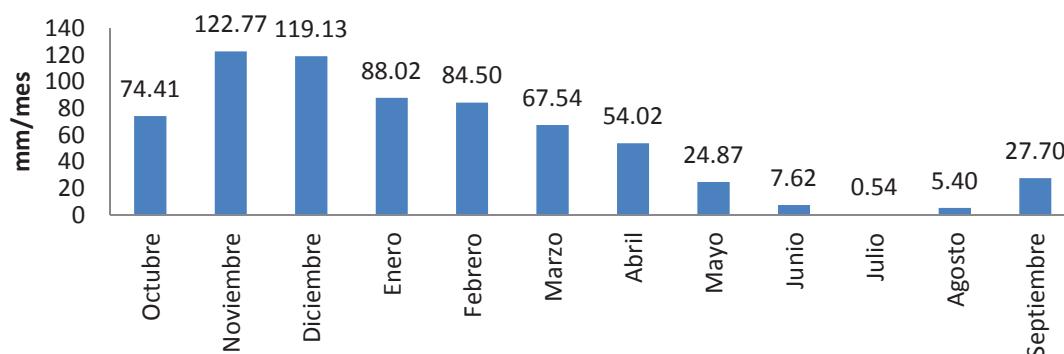


Figura 49. Precipitación media mensual para el año tipo medio de la S. de Mijas.

En las figuras siguientes (*figuras 50 y 51*) se puede observar la distribución temporal de la precipitación lo largo del periodo de estudio (1980-2014). Se observa una tendencia de aumento en la cantidad de precipitación durante el periodo de estudio.

En la serie de 35 años de datos diarios, resultan las siguientes intensidades medias diarias de precipitación en la S. de Mijas (*tabla 27*):

1980-2014	Total	P>5	P>10	P>20	P>50	P>100	P>200
<b>Días al Año</b>	64.89	29.86	19.74	10.66	2.20	0.20	0.00
<b>Probabilidad</b>	0.1776	0.0817	0.0541	0.0292	0.0060	0.0005	0.0000
<b>Periodo retorno días</b>	5.6	12.2	18.5	34.3	166.0	1826.3	0.0
<b>Periodo retorno años</b>	0.02	0.03	0.05	0.09	0.45	5.00	0.00
<b>Promedio</b>	1.85						
<b>Desv. Estandar</b>	7.66						
<b>Promedio días lluvia</b>	10.43						

Tabla 27. Intensidad diaria de la precipitación en S. de Mijas.

El total pluviométrico anual se produce en 65 días al año. De estos 65 días, 19,7 días al año la intensidad de la lluvia es mayor a 10 mm/día y solo en 10,7 días al año es superior a 20 mm/día. Intensidades superiores a los 50 mm/día sólo ocurren 2,2 días al año. Episodios con intensidades superiores a 100 mm/día ocurren con un periodo de retorno de 5 años, mientras que los superiores a 200 mm/día no se han producido en el periodo 1980-2014.

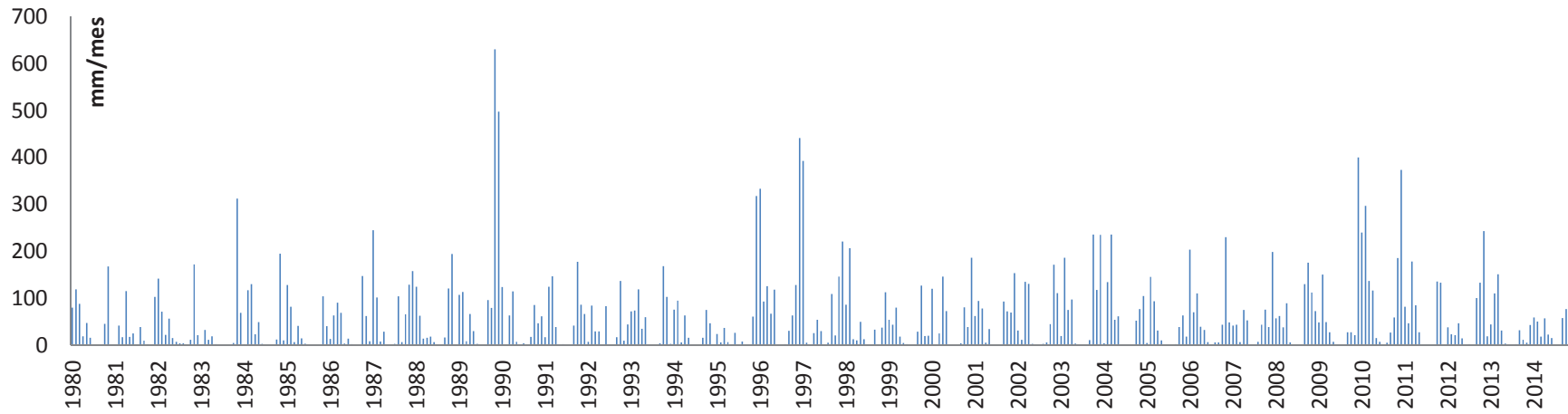


Figura 50. Precipitación mensual para el periodo de estudio de S. de Mijas.

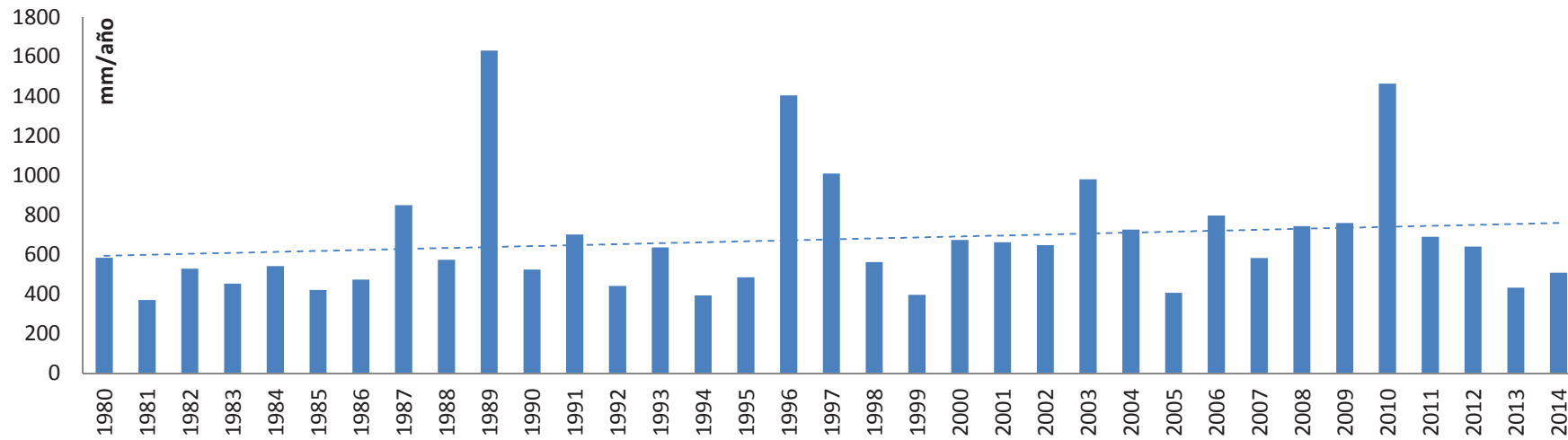


Figura 51. Precipitación anual para el periodo de estudio de S. de Mijas.

### 3.5.2. Temperatura.

Se ha calculado la temperatura media en S. de Mijas, obteniéndose los valores medios de los años tipo de la *tabla 28*.

	TMED año frio (°C)	TMED año medio (°C)	TMED año cálido (°C)
S. Mijas	16,04	19,18	26,35

Tabla 28. Años tipo de temperatura media en las peridotitas de S. de Mijas.

De este modo, en el periodo 1980-2014, la temperatura media en S. de Mijas es de 19,18 °C en el año tipo medio, con los valores de 16,04 °C correspondientes al año de tipo frio y 26,35 °C en el de tipo cálido.

En la *figura 52* se representa la temperatura media mensual del año de tipo medio. El mes más frío es Enero (12,46 °C) mientras que el más cálido es Agosto (27,18 °C), con una amplitud térmica anual de 13,61 °C.

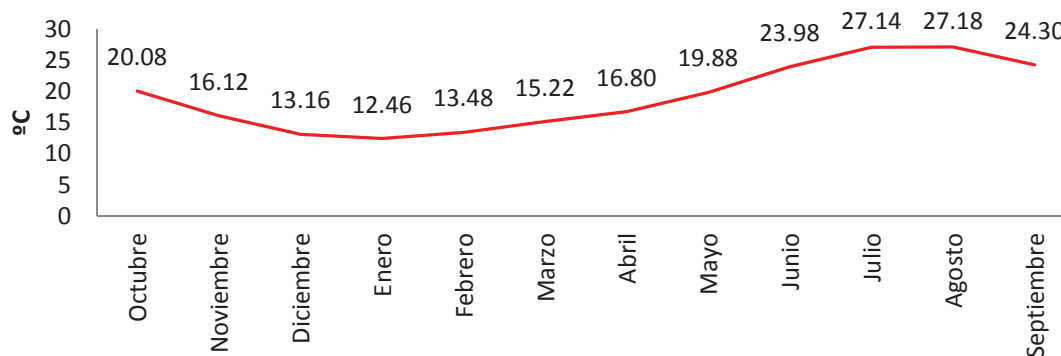


Figura 52. Temperatura media mensual para el año tipo medio en las peridotitas de S. de Mijas.

En la figura siguiente (*figura 53*) se puede observar la distribución temporal de la temperatura media mensual a lo largo del periodo de estudio (1980-2014).

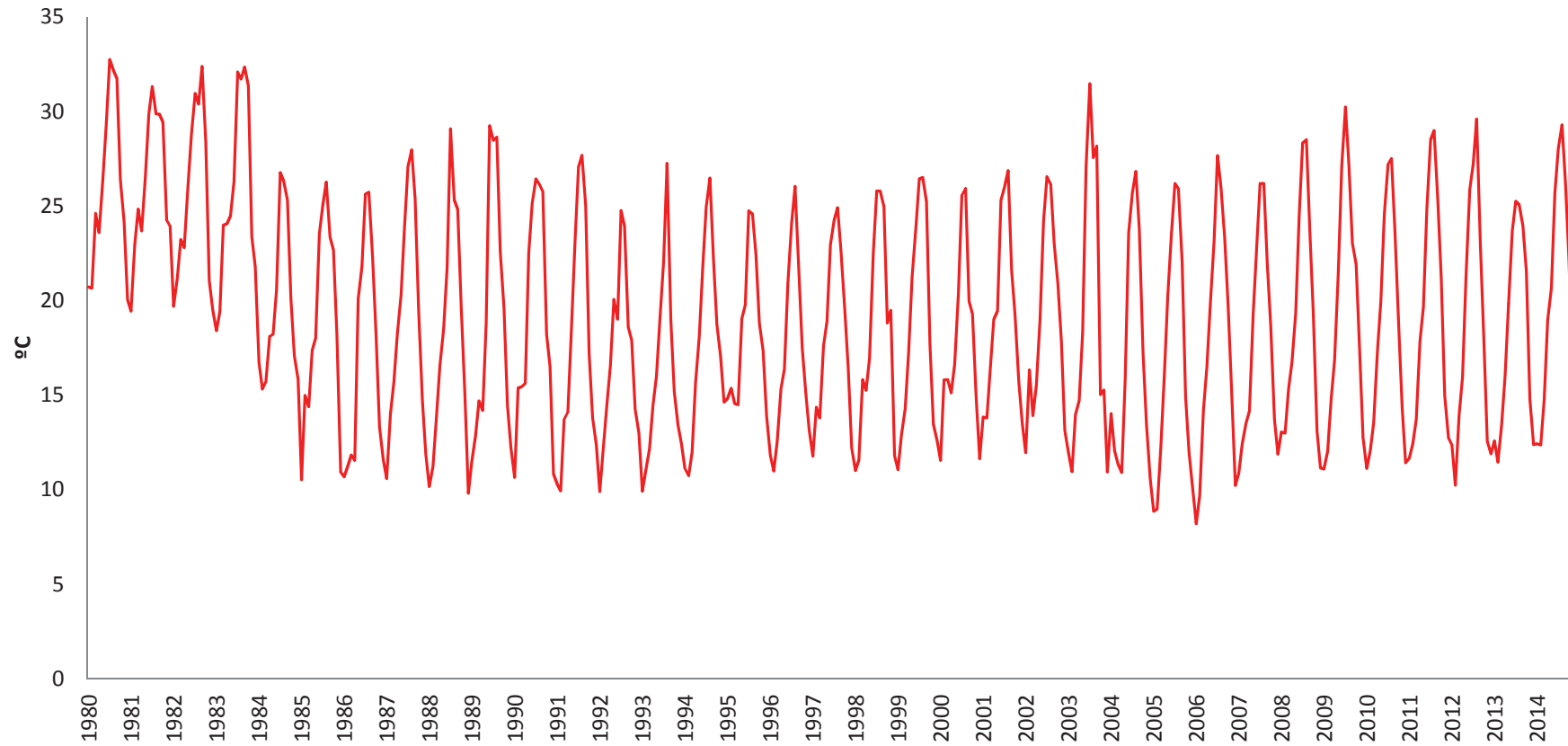


Figura 53. Temperatura mensual para el periodo de estudio en las peridotitas de S. de Mijas.

### 3.5.3. Evapotranspiración potencial.

Los valores medios de los años tipo de la ETP en S. de Mijas, que se recogen en la siguiente tabla:

	ETP año frio (mm)	ETP año medio (mm)	ETP año cálido (mm)
S. Mijas	1022	1467	2143

Tabla 29. Años tipo de ETP (Hargreaves) en S. de Mijas.

La ETP media en la zona es de 1467 mm/año, con valores extremos de 1022 mm/año y 2143 mm/año.

El mes con menor ETP es Diciembre (47 mm) mientras que el mes con la ETP más elevada es Julio (209 mm) (figura 54).

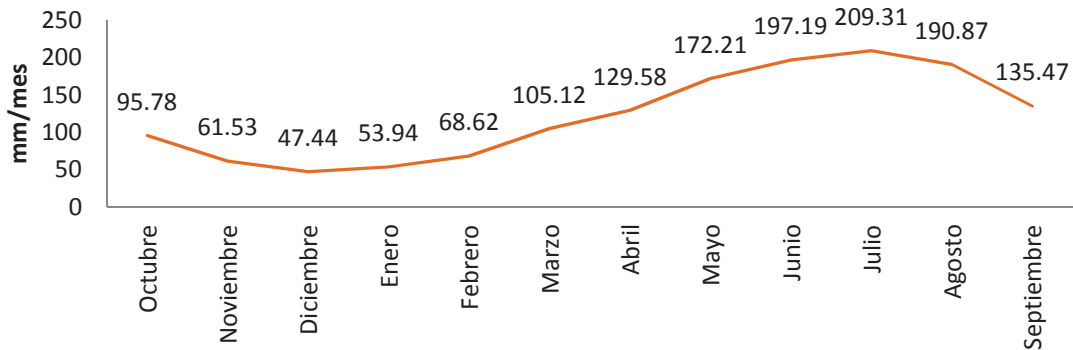


Figura 54. ETP (Hargreaves) media mensual para el año tipo medio de S. de Mijas.

### 3.5.4. Balance agua en el suelo.

Los balances de agua en el suelo se han realizado aplicando el modelo de Thornthwaite a los datos contenidos en las series de precipitación y ETP diarias, esta última calculada con la expresión de Hargreaves. Se han utilizado capacidades de retención de agua en el suelo de 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250 mm. Para el cálculo de la infiltración se ha

usado el método del número de curva, para dos valores del umbral de escorrentía: grupos de suelo B (capacidad de infiltración moderada) y C (infiltración lenta).

En la *figuras 55, 56 y 57* se representan los valores de lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y escorrentía (ESC) en función de los diferentes valores de la capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS), para un valor de umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 20,57:

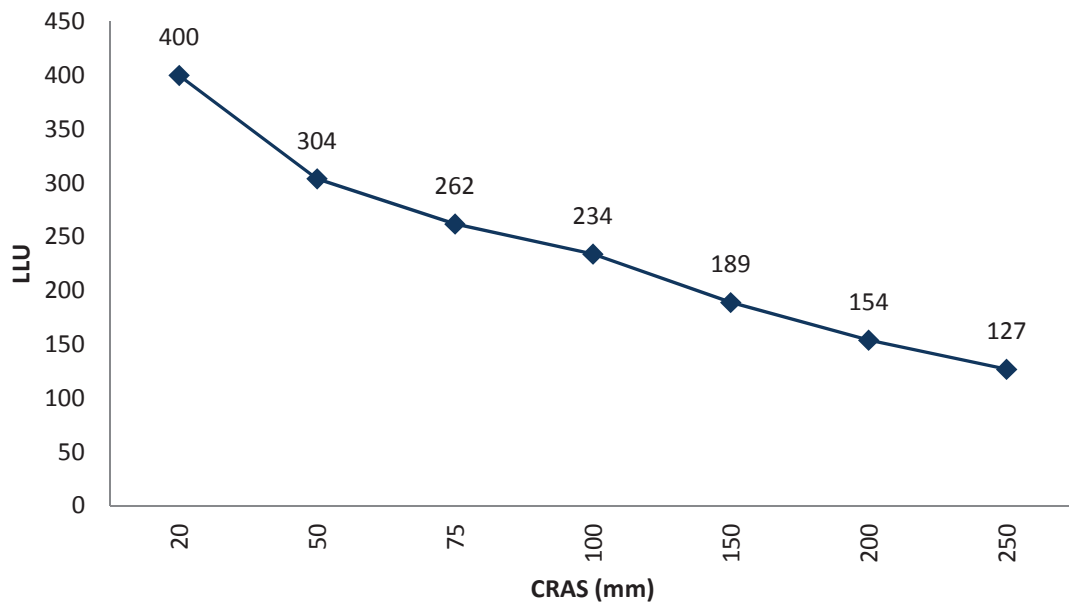


Figura 55. Lluvia útil en función de la CRAS para S. de Mijas.

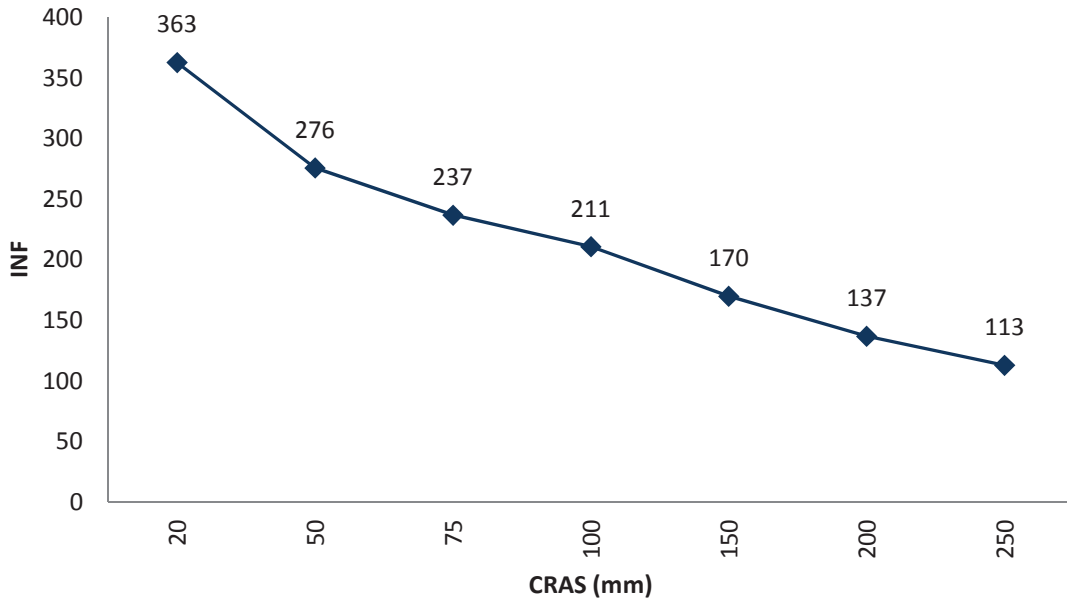


Figura 56. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 20,57 en S. de Mijas.

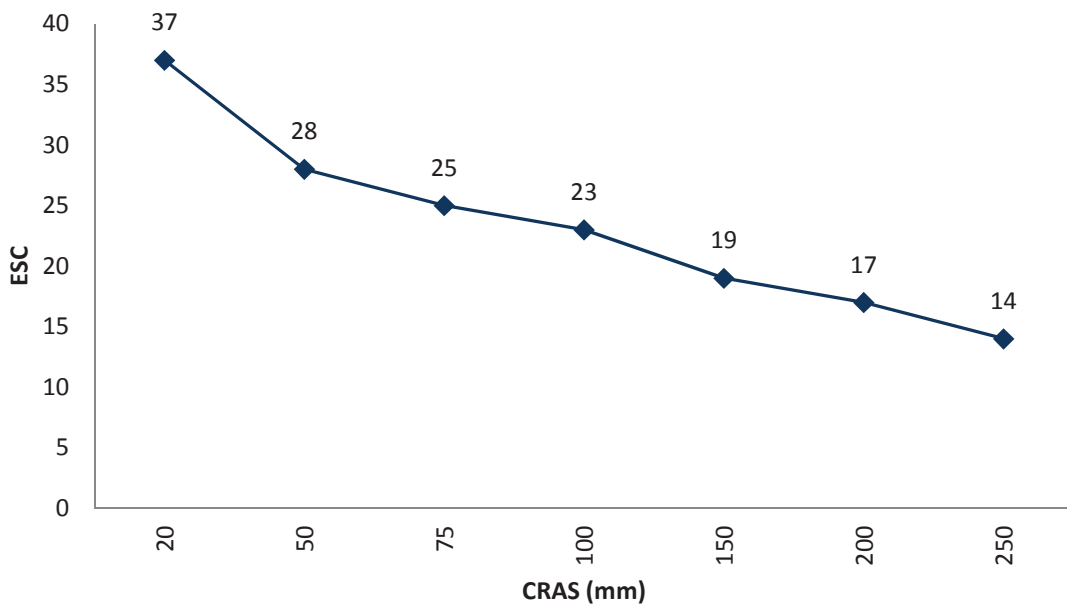


Figura 57. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 20,57 en S. de Mijas.

En la *figuras 58*, y *59* se representan los valores de INF y ESC en función de la CRAS, para un valor de umbral de escorrentía de 12,69:

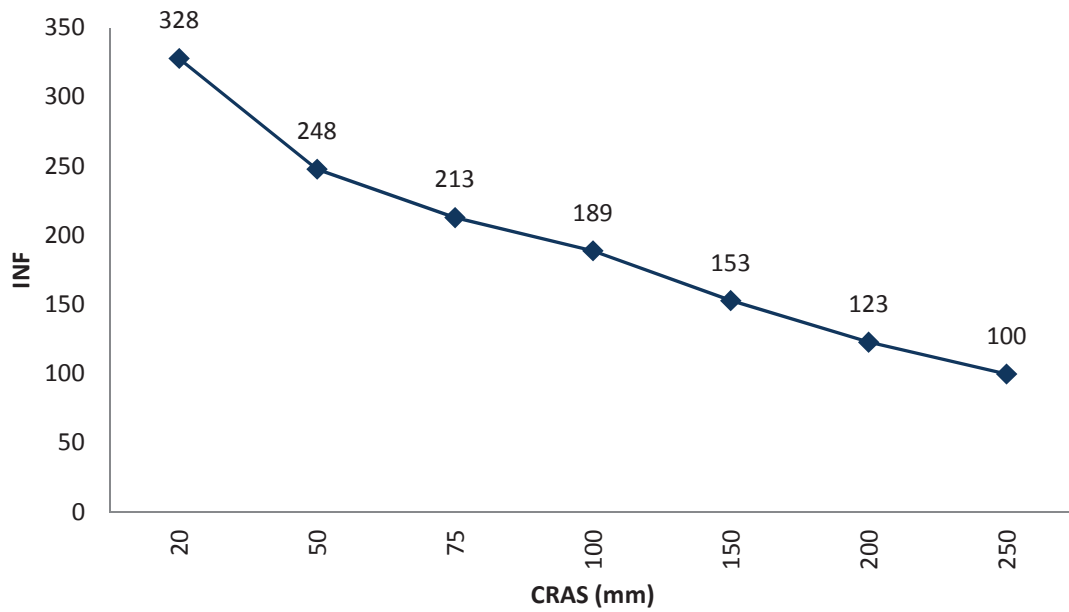


Figura 58. Infiltración en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 12,69 en S. de Mijas.

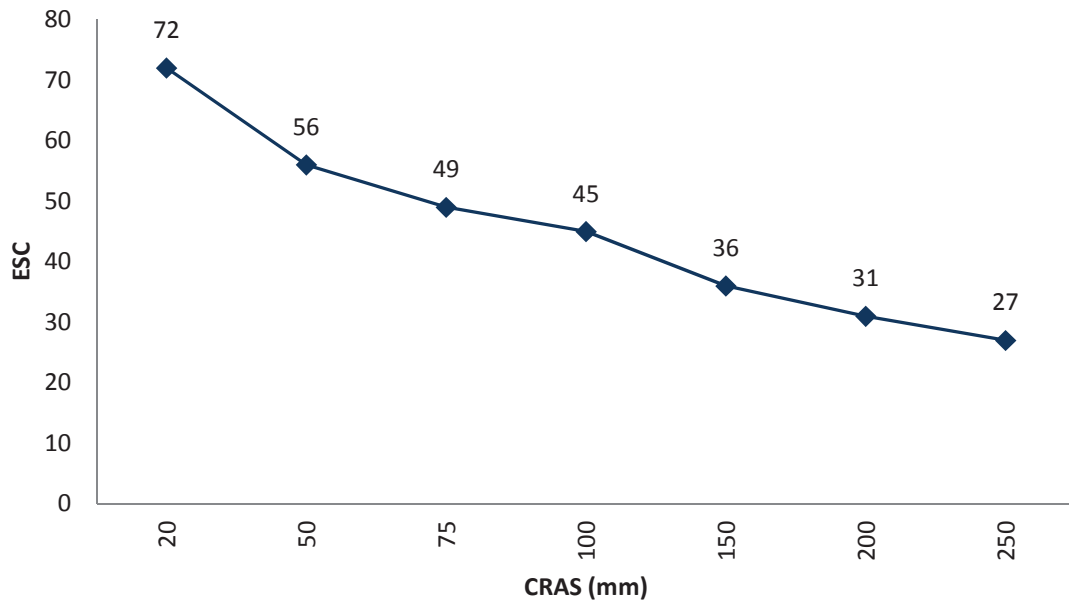


Figura 59. Escorrentía en función de la CRAS para un valor de  $P_0$  de 12,69 en S. de Mijas.

Se observa como es lógico que los valores de lluvia útil, infiltración y escorrentía descienden al aumentar el valor de la CRAS, y que un mayor umbral de escorrentía supone una mayor infiltración y una menor escorrentía.



#### **4. Referencias.**

- Andreo Navarro, B. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las sierras Blanca y de Mijas*. UMA, 1997. 489pp
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56*, Roma.
- Alley, W. M. 1984. Treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance model. *Water Resour. Res.*, 20(8), 1137- 1149.
- Benavente, J. 1982. *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral. Univ. Granada, 571pp. Edición resumida en 1985, bajo el título “Las aguas subterráneas de la Costa de Sol de Granada”. 336 pp.
- Carrera, J. y Saaltink, M. W. 2002. Balance de agua en el suelo. Métodos hidrometeorológicos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Choisnel, E., de Villele, O. y Lacroze, F. 1992. Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne. *Commission des Communautés Européennes*, Luxembourg.
- Creutin, J. D. y Obled, C. 1982. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resour. Res.*, 18, 413-441.
- FAO. 1970. *Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Guadalquivir. España*. Hidrogeología. Instituto Geológico de España, Madrid.
- Gavilán, P., Tornero, S., Lorite, I. y Berengena, J. 2005. Precisión de la ecuación de Hargreaves en el Sur de España. *VI Simposio del Agua en Andalucía*, 227-236.
- Giménez, J., 2007. *Variabilidad espacio-temporal de los recursos hídricos de la cuenca del río Guadalfeo*. Trabajo de Investigación. Universidad de Granada, Granada, 177 pp.
- Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Liñán Baena, C. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la Unidad Junquera – Nieves (Málaga)*. IGME, 2005. 224pp (Hidrogeología y Aguas Subterráneas;16).
- Martos-Rosillo, S. 2008. *Investigación hidrogeológica orientada a la gestión racional de acuíferos carbonáticos sometidos a un uso intensivo del agua subterránea*. El

- caso de la Sierra de Estepa (Sevilla)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Granada, 537 pp.
- Milly, P. C. D. 1994. Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance. *Advances in Water Resources*, (17), 19-24.
- Morell, I., 1976. *Estudio hidrogeológico del curso medio del río Guadalfeo (Granada)*. Tesis Licenc. Univ. Granada (inédita), Granada, 138 pp.
- Padilla y Delgado, 2014. Manual del usuario de la Aplicación Trasero 2.0. Departamento de ciclo hídrico. Diputación Provincial de Alicante.
- Pardo E., Martos, S., Luque, J.A., Durán J.J., Guardiola, C. y Robledo, P.A. *Estimación espacio-temporal de la recarga del acuífero kárstico de Sierra de Las Nieves (Málaga)*. SIAGA 2012. IGME.
- Pulido Bosch, A., 1980. *Datos hidrogeológicos sobre el borde Occidental de Sierra Nevada*. Serie Univ. Fund. J. March. Madrid, 51 pp.
- Samani, Z. A., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, nº 4: 265-267.
- Samper, J. 1998. Evaluación de la recarga por lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, 109(4), 31- 54.
- Témez, J.R. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales. MOPU.
- Thornthwaite, G. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographycal*. 38: 59-64.
- Vanderlinden, K. 2002. Análisis de procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciotemporales. Universidad de Córdoba, Córdoba, 303 pp.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J. V. y Van Mervenne, M. 2003. *Evaluación de la capacidad de retención de agua de los suelos de Andalucía mediante el análisis del balance medio anual del agua*. En: P. Marinero (Ed.) Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, 6, 131-136.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J. V. y Van Mervenne, M. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267.